

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Atlas do Potencial Eólico para o arquipélago de Cabo Verde

Adriano Lopes Monteiro

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
Professora Doutora Ana Isabel Lopes Estanqueiro
Professora Doutora Teresa Maria Veloso Nunes Simões Esteves

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer, aos meus orientadores, à Professora Doutora Ana Estanqueiro e à Professora Doutora Teresa Simões, pela oportunidade que me deram para desenvolver este trabalho.

Ao Engenheiro António Couto, ao Engenheiro João Silva e ao Engenheiro Duarte Santos pela disponibilidade, pelo apoio, pela sabedoria e pela orientação ao longo destes meses.

À Engenheira Paula Costa, pelo apoio e pela disponibilidade.

À minha mãe pelo apoio incansável em todos os aspetos e por tudo que fez e faz por mim, um enorme muito obrigado!

Aos meus irmãos pela amizade e por terem sido sempre um exemplo para mim!

À Mariana pela paciência e pelo apoio!

E, por último, ao Diogo Araújo, Bruno Veiga, Bruno Rita, Fábio Pinheiro, Carlos Sousa, Tiago Chaves, Adyler Frota, João Cordeiro, Sérgio Duarte, Carla Reia, Miguel Runa, Márcio Pedroso, Diogo Almeida e João Vieira pela companhia e motivação durante estes anos que passámos juntos.

Resumo

A aposta no desenvolvimento sustentável, e o aumento da procura de energia, faz com que exista um enorme interesse em fontes de energias renováveis em Cabo Verde. De facto, o governo Cabo Verdeiano, ciente da necessidade da avaliação dos recursos renováveis do país, elaborou estudos com o intuito de reservar zonas para possíveis aproveitamentos de energia eólica. Atualmente, a energia eólica representa 92 % da capacidade renovável instalada no país, no entanto, este valor corresponde apenas a 19 % do consumo final de energia.

Por forma a permitir uma descarbonização do sistema electroprodutor, e uma integração em larga escala da energia eólica, o mapeamento com elevada precisão do recurso eólico torna-se inevitável. Neste trabalho, apresenta-se uma metodologia para o desenvolvimento do atlas do potencial eólico para o arquipélago de Cabo Verde, bem como a identificação do potencial eólico sustentável existente no arquipélago. O desenvolvimento do atlas do vento foi baseado no modelo numérico de mesoescala *Fifth generation Mesoscale Model* (MM5) e a identificação do potencial eólico sustentável com recurso a um sistema de informação geográfica – *software* ArcGIS.

Numa primeira fase, efetuaram-se um conjunto de testes de sensibilidade às simulações numéricas de modo a calibrar o modelo de mesoescala de acordo com as características meteorológicas da região em estudo. A calibração do modelo incidiu *i)* nos dados meteorológicos de condição inicial e de fronteira, e *ii)* nas suas parametrizações físicas recorrendo aos dados observados em três estações meteorológicas da região publicamente disponíveis e a parâmetros estatísticos como o viés e a correlação. Depois de calibrado o modelo, efetuaram-se simulações numéricas para a obtenção da distribuição espacial do campo médio do escoamento e a sua direção para todo o arquipélago de Cabo Verde, com base nos dados do projeto reanálise *Global Forecast System* (GFS) correspondentes ao período entre fevereiro de 2015 e janeiro de 2017.

Numa segunda fase, efetuou-se a identificação do potencial eólico sustentável disponível para exploração em todas as zonas administrativas do país recorrendo ao *software* ArcGIS. O processo de identificação do potencial eólico sustentável inclui a introdução de critérios e restrições de forma a que os possíveis aproveitamentos eólicos sejam economicamente viáveis. Neste estudo incluíram-se critérios do recurso eólico mínimo, restrições ambientais e de ocupação, e ainda a exclusão das áreas ocupadas pelos parques eólicos em exploração no país. As estimativas energéticas foram efetuadas com base em dois tipos de turbinas eólicas, Vestas V52 850 kW e Vestas V80 2 MW.

O estudo realizado permitiu identificar o potencial eólico existente no arquipélago de Cabo Verde e os locais adequados à instalação de parques eólicos. Desta forma, os resultados deste trabalho permitem obter indicadores energéticos de auxílio, não só à decisão no planeamento de novas redes elétricas e infraestruturas, mas também, aos investimentos em campanhas experimentais de promotores eólicos e investidores.

Palavras-Chave: Atlas do recurso eólico de Cabo Verde, Potencial eólico sustentável, Modelo numérico de mesoescala – MM5, Sistemas de Informação Geográfica – SIG, ArcGIS

Abstract

The focus on sustainable development and increasing demand for energy means that there is a huge interest in renewable energy sources in Cape Verde. Currently, wind energy represents 92% of the renewable capacity installed in the country; however, this figure corresponds to only 19% of final energy consumption.

To permit the decarbonisation of the electric power system, the government, aware of the need to evaluate the country's renewable resources, has developed studies with the aim of reserving areas for possible use of wind energy. To enable large-scale integration and, consequently, a high penetration of wind energy, reliable high-resolution wind Atlas becomes crucial.

In this work, a methodology is presented for the development of Atlas of the wind potential for the Cape Verde archipelago, as well as the identification of the sustainable wind potential existing in the archipelago. The development of the wind atlas was based on the mesoscale numerical model Fifth Generation Mesoscale Model (MM5) and the identification of sustainable wind potential using a geographic information system - ArcGIS.

In a first phase, a set of sensitivity tests were performed on the numerical simulations to calibrate the numerical model according to the meteorological characteristics of the region under study. The calibration of the model focused on *i*) the initial and boundary meteorological data conditions, and *ii*) its physical parameterizations using the data observed in three meteorological stations of the region publicly available and statistical parameters such as bias and correlation. After calibrating the model, numerical simulations were carried out to obtain the spatial distribution of the mean flow field and its direction for the entire Cape Verde archipelago, based on data from the Global Forecast System (GFS) reanalysis project for the period between February 2015 and January 2017.

In a second phase, the sustainable wind potential available for exploration in all administrative areas of the country was identified using the ArcGIS software. The sustainable wind potential includes the introduction of criteria and restrictions to identify regions that are economically viable to explore wind power. This study included minimum wind resource criteria, environmental and occupancy restrictions, and the exclusion of areas occupied by wind parks in the country. Energy estimates were based on two types of wind turbines, Vestas V52 850 kW and Vestas V80 2 MW.

The study identifies the wind potential in the Cape Verde archipelago and the appropriate locations for wind power exploitation. In this way, the results from this work enable to obtain indicators supporting not only in the planning of new electricity networks and infrastructures but also in the selection of experimental campaigns of wind developers and investors.

Keywords: wind resource Atlas for Cape Verde, Sustainable wind potential, Numerical model of mesoscale - MM5, Geographic Information Systems - GIS, ArcGIS.

Índice

Resumo.....	v
Abstract	vi
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas.....	xi
Simbologia e Notações.....	xiii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento geográfico de Cabo Verde.....	2
1.2. Setor energético de Cabo Verde.....	2
1.3. Energias renováveis em Cabo Verde.....	4
1.4. Objetivos da dissertação.....	6
1.5. Estrutura da dissertação.....	7
2. Planeamento do aproveitamento da energia eólica	9
2.1. Mapeamento do potencial eólico.....	9
2.1.1. Atlas Global do vento.....	9
2.1.2. Estudos realizados para Cabo Verde	12
2.2. A utilização dos Sistemas de Informação Geográfica.....	14
3. Fundamentos teóricos.....	16
3.1. O escoamento atmosférico	16
3.1.1. Circulação global atmosférica	16
3.1.2. Circulações locais.....	20
3.1.3. Camada limite atmosférica.....	23
3.1.4. Energia do Vento.....	28
3.1.5. Clima característico de Cabo Verde	30
3.2. Modelo numérico – MM5	31
3.3. SIG – Aspetos gerais	35
3.3.1. Modelos de dados.....	35
3.3.2. Dados de entrada	36
3.3.3. Tratamento de dados	36
4. Metodologia para identificação do potencial eólico sustentável.....	39
4.1. Metodologia do desenvolvimento do Atlas do Potencial Eólico.....	40
4.1.1. Seleção das condições de fronteira/iniciais do modelo	40
4.1.2. Identificação dos domínios de simulação.....	43
4.1.3. Calibração do modelo numérico.....	46
4.2. Metodologia para a identificação do Potencial Eólico Sustentável.....	47
4.2.1. Determinação do NEPs	48
4.2.2. Declive do terreno	49

4.2.3.	Restrições Ambientais, acessos e parques eólicos existentes em Cabo Verde.....	50
4.2.4.	População e ocupação do solo.....	51
4.2.5.	União das áreas de restrição	53
5.	Apresentação e discussão de resultados	55
5.1.	Atlas do Potencial Eólico de Cabo Verde	55
5.1.1.	Validação das simulações de mesoescala.....	55
5.1.2.	Mapeamento do campo médio da velocidade e direção do vento	59
5.1.3.	Mapeamento do campo do número de horas equivalentes a potência nominal (NEPs) 67	
5.2.	Estimativa do Potencial Sustentável.....	74
5.2.1.	Mapeamento do potencial eólico sustentável.....	74
5.2.2.	Cálculo do potencial sustentável para cada zona administrativa do país	82
5.2.3.	Síntese dos resultados obtidos.....	85
6.	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	86
6.1.	Desenvolvimentos futuros.....	87
7.	Referências Bibliográficas	88
	Anexos.....	92
A.	Calibração das parametrizações físicas do modelo MM5	94
B.	Análise da variabilidade do recurso eólico.....	97
C.	Mapa dos declives do terreno para cada ilha.....	99
D.	Mapa da densidade populacional	101
E.	Mapas dos acessos, das zonas protegidas e dos parques eólicos existentes em Cabo Verde 103	
F.	Mapas das restrições ambientais e de terreno	106
G.	Mapas dos parâmetros de Weibull (A e k) para alturas de 52 e 80 metros	108

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Representação geográfica do arquipélago de Cabo Verde.....	2
Figura 1.2 – Evolução da procura e a previsão para 2020. Fonte [14]......	4
Figura 1.3 – A localização dos parques eólicos e as suas respectivas capacidades instaladas.	5
Figura 2.1 – Mapa da velocidade média do vento a 50 metros de altura. Fonte [23]......	10
Figura 2.2 – Mapa do Atlas Global do Vento para uma altura de 100 metros. Fonte [24].	11
Figura 2.3 – Velocidade média do vento a 50 metros por aplicação do modelo WAsP para o arquipélago de Cabo Verde. Fonte [26].	12
Figura 2.4 – Potência disponível para a exploração em cada Ilha, definidas segundo as Zonas de Desenvolvimento para Energias Renováveis (ZDER). Fonte [13].	13
Figura 2.5 - Representação esquemática dos processos inerentes à avaliação da adequação da zona oriental de Massachusetts. Fonte [34]......	15
Figura 3.1 – Distribuição idealizada do vento e da pressão sobre a superfície da terra rotativa, uniformemente coberta de água [35]......	17
Figura 3.2 – Estabelecimento do equilíbrio geostrófico numa atmosfera com um gradiente horizontal de pressão (para hemisfério Norte). Figura extraída de [37]......	18
Figura 3.3 – Efeito da força de atrito num regime ciclónico e anticiclónico. Fonte [38]......	20
Figura 3.4 – Desenvolvimento da brisa a) marítima e b) terrestre. Fonte [35].	22
Figura 3.5 – Brisa de vale e de montanha. Fonte [39]......	22
Figura 3.6 – Representação da camada limite atmosférica. Fonte [40] e [41].	23
Figura 3.7 – Efeito da rugosidade do solo na CLA [43].	23
Figura 3.8 – Perfil/estrutura da CLA. Fonte [44]......	24
Figura 3.9 – Precisão nas estimativas em função da duração de uma campanha experimental. Fonte [45].	26
Figura 3.10 – Influência de um obstáculo no escoamento atmosférico. Fonte [46]......	27
Figura 3.11 – Influência da orografia na circulação do vento. Fonte [47].	27
Figura 3.12 – Formas dos montes por ordem de preferência. Fonte [48].	28
Figura 3.13 – Orientação ideal da linha de cumeeada em relação à direção do vento. Fonte [48]. ...	28
Figura 3.14 – Módulos de pré e pós processamento do modelo numérico MM5. Fonte [56]......	32
Figura 3.15: Esquematização de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) [58].	35
Figura 4.1 – Mapa de Cabo Verde com as localizações das três estações meteorológicas utilizadas nos estudos efetuados.	41
Figura 4.2 – Domínio "mãe" (D01) e subdomínios (D02-4) definidos no MM5 para o desenvolvimento do Atlas do potencial eólico de Cabo Verde.	45
Figura 4.3 – Esquema simplificado da metodologia do cálculo do potencial eólico sustentável....	47
Figura 4.4 – Curvas de potência das turbinas eólicas: Vestas V52 de 850 kW e Vestas V80 de 2000 kW.	49
Figura 4.5 – Transformação dos declives de graus (°) para percentagem (%) de inclinação.	49
Figura 4.6 – Declive de terreno (%) para a ilha de Santiago.	50
Figura 4.7 – Mapa dos acessos, das zonas protegidas (reservas/parques naturais) e da área ocupada pelo parque eólico para a ilha de Santiago.	51
Figura 4.8 – Mapeamento da densidade populacional para a ilha de Santiago.	52
Figura 4.9 – Restrições ambientais e de terreno para a ilha de Santiago.	54
Figura 5.1 – Perfil anual da velocidade média do vento dos dados: a) observados e b) simulados para a estação meteorológica GVAC - Sal.	55
Figura 5.2 – Perfil anual da velocidade média do vento dos dados: a) observados e b) simulados para a estação meteorológica GVNP - Santiago.	56
Figura 5.3 – Perfil anual da velocidade média do vento dos dados: a) observados e b) simulados para a estação meteorológica GVSV – São Vicente.	56
Figura 5.4 – Mapa médio simulado da intensidade e direção do vento para uma altura de 52 metros.	60
Figura 5.5 – Mapa médio simulado da intensidade e direção do vento para uma altura de 80 metros.	64

Figura 5.6 – Distribuição espacial do número de horas equivalentes a potência nominal (NEPs) para a turbina eólica Vestas V52 de 850 kW (h = 52m).	68
Figura 5.7 – Distribuição espacial do número de horas equivalentes a potência nominal (NEPs) para a turbina eólica Vestas V80 de 2000 kW (h = 80m).	71
Figura 5.8 – NEPs para a turbina eólica Vestas V52 de 850 kW a uma altura de 52 metros após intersecção das condicionantes.....	75
Figura 5.9 – Número de horas equivalentes à potência nominal, NEPs, para a turbina eólica Vestas V80 de 2000 kW a uma altura de 80 metros.	78
Figura 5.10 – Potencial eólico sustentável disponível para cada ilha - turbina eólica Vestas V52 de 850 kW.	83
Figura 5.11 – Potencial eólico sustentável disponível para cada ilha - turbina eólica Vestas V80 de 2000 kW.	84
Figura 5.12 - Potencial eólico sustentável estimado através das turbinas eólicas Vestas V52 de 850 kW e Vestas V80 de 2000 kW e a potência disponível definidas nas ZDER.	85
Figura 8.1 – Erro médio quadrático (RMSE) para os diferentes testes efetuados para o mês de abril de 2015.....	95
Figura 8.2 – Erro médio absoluto (MAE) para os diferentes testes efetuados para o mês de abril de 2015.....	95
Figura 8.3 – Viés para os diferentes testes efetuados para o mês de abril de 2015.....	95
Figura 8.4 – Parâmetros estatísticos correspondentes aos testes 0 (barras com padrão) e 6 (barras preenchidas a cheio) para o mês de agosto de 2015.....	96
Figura 8.5 – Variabilidade do recurso eólico para o arquipélago de Cabo Verde de 1997 a 2017 para as três estações meteorológicas em estudo.....	97
Figura 8.6 – Declive do terreno para todas as ilhas de Cabo Verde.....	99
Figura 8.7 – Mapa da densidade populacional para os diferentes concelhos.....	101
Figura 8.8 – Mapa dos acessos, zonas protegidas e das áreas ocupadas pelos parques eólicos existentes para todas as ilhas de Cabo Verde.....	103
Figura 8.9 – Mapa da união das restrições ambientais e do terreno.....	106
Figura 8.10 – Mapas do parâmetro de escala da distribuição de Weibull (A [m/s]) para uma altura de 52 metros.....	108
Figura 8.11 – Mapas do parâmetro de forma da distribuição de Weibull (k) para uma altura de 52 metros.....	109
Figura 8.12 – Mapas do parâmetro de escala da distribuição de Weibull (A [m/s]) para uma altura de 80 metros.....	110
Figura 8.13 – Mapas do parâmetro de forma da distribuição de Weibull (k) para uma altura de 80 metros.....	111

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Matriz elétrica de Cabo Verde para o ano 2015. Fonte [11].	3
Tabela 2 – Localização e capacidade instalada em 2018, em MW, dos parques eólicos em operação no arquipélago de Cabo Verde.	5
Tabela 3 – Zonas de Desenvolvimento para Energias Renováveis. Fonte [13].	13
Tabela 4 – Coeficientes de atrito no solo. Fonte [41].	25
Tabela 5 – Lista das opções físicas e as opções de parametrizações, numeradas de acordo com a numeração identificada pelo MM5.	33
Tabela 6 – Características dos projetos reanálises em estudo [61] e [62].	40
Tabela 7 – Localização das estações meteorológicas em Cabo Verde.	42
Tabela 8 – Análise do <i>RMSE</i> , o Viés e a correlação para cada projeto reanálise e para diferentes estações meteorológicas em termos da velocidade do vento aos 10m.	42
Tabela 9 – Análise do <i>RMSE</i> , Viés e a correlação para cada projeto reanálise e para diferentes estações meteorológicas em termos da pressão atmosférica.	43
Tabela 10 – Características espaciais dos domínios de modelação do MM5.	46
Tabela 11 – Identificação das parametrizações mais adequadas a variabilidade da velocidade do vento na região em estudo, com base nos testes de sensibilidade efetuados.	46
Tabela 12 – Fator de ocupação do solo para os diferentes concelhos do arquipélago de Cabo Verde.	53
Tabela 13 – Classificação da ocupação do solo [29].	53
Tabela 14 – Avaliação da performance do modelo MM5 no período entre fevereiro 2015 e fevereiro 2017 para as três estações disponíveis – perfis anuais e parâmetros estatísticos (Viés, <i>RMSE</i> e correlação) para a altura de 10 metros.	57
Tabela 15 – Rosa de ventos observada e simulada nas estações meteorológicas em análise.	58
Tabela 16 – Direções médias do escoamento observadas e simuladas nas três estações meteorológicas.	59
Tabela 17 – Valores dos parâmetros assumidos no cálculo do potencial eólico sustentável para a turbina eólica Vestas V52 de 850 kW (altura de 52 metros).	82
Tabela 18 – Potencial eólico sustentável para cada zona administrativa	82
Tabela 19 – Valores dos parâmetros assumidos no cálculo do potencial eólico sustentável para a turbina eólica Vestas V80 de 2000 kW (para uma altura de 80 metros).	83
Tabela 20 – Potencial eólico sustentável para cada zona administrativa de Cabo Verde - turbina eólica Vestas V80 de 2000 kW.	84
Tabela 21 – Variações das parametrizações efetuadas dentro de cada opção física.	94
Tabela 22 – Correlação da intensidade do vento entre o projeto reanálise GFS (utilizado na simulação) e os projetos MERRA2 e Era-Interim.	97

Simbologia e Notações

A	Área do polígono i (m^2)
α	Coefficiente de perdas equivalentes de energia potencial (MW)
β	Parâmetro adimensional (MW/h)
η_i	Fator de ocupação de solo no polígono i
γ_i	Fração de área ocupada por uma turbina eólica (adimensional)
χ_i	Somatório do número de horas equivalentes à potência nominal no polígono i (horas)
ω_i	Somatório da potência dos parques eólicos em operação e em fase de construção dentro do polígono i (MW)
k	Número de parques eólicos existentes dentro do polígono i
F_i	Valores do projeto reanálise no instante de tempo i
\bar{F}	Valor médio de vento do projeto reanálise
O_i	Valores observados no instante de tempo i
\bar{O}	Valor médio do vento observado
N_i	Número total de polígonos
N	Número total de registos
CFSv2	<i>Climate Forecast System Reanalysis</i>
FIT	Frente Intertropical
GVAC	Estação meteorológica – Aeroporto Amílcar Cabral, ilha do Sal
GVNP	Estação meteorológica – Aeroporto Nelson Mandela, ilha de Santiago
GVSV	Estação meteorológica – Aeroporto Cesária Évora, ilha de São Vicente
GFS	<i>Global Forecast System</i>
MERRA2	<i>Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications</i>
MM5	<i>Fifth Generation of Mesoscale Model</i>
NEPs	Número de horas equivalentes à potência nominal de uma turbina eólica
NE	Nordeste
PERCV	Plano Energético Renovável de Cabo Verde
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
WAsP	<i>Wind Atlas Analysis and Application Program</i>
WRF	<i>Weather Research and Forecasting Model</i>
ZDER	Zonas de Desenvolvimento de Energias Renováveis

1. Introdução

Os maiores desafios energéticos da sociedade atual estão relacionados, por um lado com questões ambientais e por outro a instabilidade no preço dos combustíveis fósseis. Neste sentido, surgem assim, as energias renováveis como resposta às preocupações mencionadas [1]. Tendo Cabo Verde excelentes indicadores relativamente aos recursos renováveis [2], surge uma oportunidade única para solucionar não só os problemas referidos como reduzir a sua forte dependência energética externa. Um dos recursos renováveis mais abundantes, a energia eólica, surge como uma opção viável para o desenvolvimento sustentável de Cabo Verde, podendo, em combinação com outras fontes renováveis, reduzir substancialmente o uso de combustíveis fósseis a longo prazo [3].

Ao longo do século XX, a energia eólica como fonte alternativa de energia tem mostrado a sua importância no mercado energético a nível mundial. Historicamente, o aproveitamento do vento foi extremamente útil para o homem em diversas atividades, *e.g.*, com a utilização de máquinas simples e rústicas na bombagem de água e moagem de cereais. No final do século XIX e durante todo o século XX, a utilização do vento para a geração de energia elétrica foi marcada por grandes desafios no âmbito do desenvolvimento tecnológico e da sua integração nos sistemas electroprodutores. Vários países, como a Dinamarca, os Estados Unidos da América e Canadá, investiram em diversos protótipos de turbinas eólicas para serem conectadas à rede e fornecer energia elétrica [4]. O mercado eólico mundial experimentou profundas transformações principalmente após a crise energética da década de 70. Subsídios e leis, que garantiam a compra da energia elétrica proveniente de fontes renováveis a preços fixos, ampliaram o uso da energia eólica no portfólio da geração de energia elétrica em diversos países por todo o mundo [5]. Um dos grandes incentivos para o uso dessa forma de energia é o seu baixo impacto ambiental. Neste contexto, o aproveitamento do recurso eólico no mundo, cada vez mais, consolida-se como uma alternativa viável e limpa para satisfazer o consumo de energia.

Atualmente a energia eólica compõe matrizes energéticas de muitos países e, uma vez que o seu recurso primário – vento – oferece uma opção para suprir as necessidades energéticas, e em conjunto com outras fontes renováveis, poderão conciliar-se as necessidades de uma sociedade industrial moderna com os requisitos necessários para preservar o ambiente. As questões ambientais, hoje mais do que nunca, impulsionam a comunidade mundial na busca de soluções eficientes e ecologicamente limpas para suprir as necessidades energéticas. O crescimento de mercado e o desenvolvimento tecnológico nos últimos anos têm erguido a energia eólica como uma opção imprescindível para o fornecimento de energia limpa [5]. No entanto, ainda existem constrangimentos na integração da energia eólica na rede elétrica. Um dos fatores que influencia a integração de parques eólicos na rede elétrica é o recurso eólico disponível e as suas características, ou seja, velocidade do vento, direção, turbulência do escoamento atmosférico, etc. As características da rede elétrica constituem outro fator de extrema relevância para a penetração da energia proveniente de fontes renováveis estocásticas na rede, onde parâmetros como: a tensão no ponto de interligação e a sua regulação e a potência de curto-circuito definem a qualidade da rede, ou seja, se uma rede elétrica é ou não fraca [6]. Normalmente, as redes recetoras dos sistemas isolados, como é o caso de Cabo Verde, constituem as maiores barreiras à integração de parques eólicos, por serem redes muito fracas, resultantes de uma baixa potência de curto-circuito. Desta forma, para a integração de energia eólica na rede elétrica é necessário analisar o consumo da potência reativa de forma a efetuar um correto dimensionamento do sistema de compensação variável de potência reativa, permitindo *i)* otimizar a integração e *ii)* melhorar o perfil da tensão no parque eólico e do ponto de interligação à rede local [6].

O aproveitamento do vento como recurso primário para a geração de energia elétrica apresenta, como toda tecnologia energética, algumas características ambientais desfavoráveis como, por exemplo:

impacto visual, ruído, interferência eletromagnética e danos à fauna. Um dos aspetos positivos está no facto de 99% da área usada para um parque eólico poder ser utilizada para outros fins, como a pecuária e atividades agrícolas [7].

Os números indicam o crescente aproveitamento da energia eólica, em várias partes do mundo, com um aumento da capacidade instalada de 17% [8] no ano 2015 em relação a 2014, o que comprova a maturidade da tecnologia. Para maximizar a eficiência do aproveitamento eólico, em qualquer parte do mundo, torna-se indispensável o levantamento do seu potencial através de estudos preliminares utilizando-se modelos numéricos de mesoescala e microescala. É com este propósito que, o desenvolvimento do Atlas do potencial eólico para o arquipélago de Cabo Verde realizado neste trabalho pretende disponibilizar toda a informação relativa à avaliação detalhada da intensidade e direção do vento e das suas características de forma a permitir, de uma forma sustentável, aumentar a penetração de energia eólica no sistema electroprodutor.

1.1. Enquadramento geográfico de Cabo Verde

O arquipélago de Cabo Verde tem como capital a cidade da Praia (ilha de Santiago), tem uma área de 4.033 km² e uma população residente de 553 432 indivíduos [9]. Localizado em pleno Oceano Atlântico, ao largo do Senegal e da Mauritânia, está a uma distância de cerca de 455 km da costa ocidental da África. É constituído por dez ilhas (Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia, São Nicolau, Sal, Boavista, Maio, Santiago, Fogo e Brava), sendo uma desabitada, a de Santa Luzia, e 8 ilhéus (Branco, Raso, Grande, Luís Carneiro, Cima e os ilhéus do Rombo ou Seco), dispondo de uma zona económica exclusiva de 730 000 km² [10] (Figura 1.1).

As ilhas dividem-se em dois grupos, consoante a sua posição geográfica relativamente aos ventos dominantes: Barlavento, do lado que sopra o vento (Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia, São Nicolau Sal e Boavista) e Sotavento, do lado oposto ao vento (Brava, Fogo, Santiago, Maio) [10].

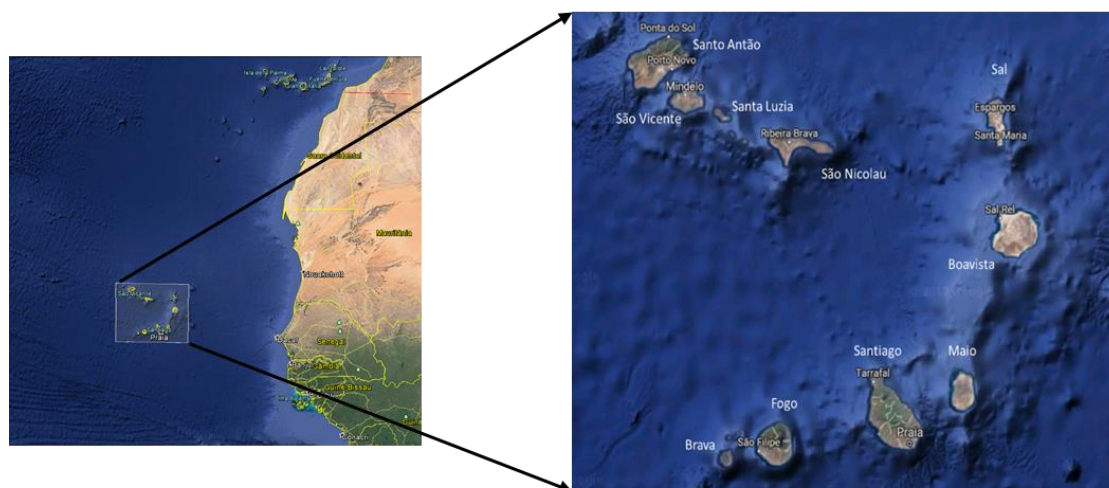


Figura 1.1 – Representação geográfica do arquipélago de Cabo Verde.

1.2. Setor energético de Cabo Verde

Atualmente, a energia elétrica em Cabo Verde é gerada a partir de três fontes de energia: solar fotovoltaica, eólica e geradores a diesel e fuelóleo, cuja respetiva produção por ilha é apresentada na

Tabela 1. Cabo Verde como um país de nível de desenvolvimento médio, depende fortemente da importação de combustíveis fósseis, representando 79% da energia elétrica consumida no país no ano de 2015 [11], que, para além de ser poluente, é cara e sensível às flutuações dos preços de mercado. Uma das estratégias do governo passa por reduzir a dependência dessas importações através da aposta nas energias renováveis, sendo que, esta aposta tem um forte impacto na política de sustentabilidade energética, na economia do país, na sociedade e no melhoramento da qualidade ambiental [12]. A inexistência de transporte de eletricidade entre as ilhas impossibilita a gestão dos sistemas elétricos de energia como um único sistema, obrigando a que, em cada ilha os sistemas elétricos de energia funcionem isolados, fazendo com que existam instalados em cada ilha sistemas de armazenamento de combustíveis. Estes sistemas de pequena dimensão são um dos fatores que tem conduzido a problemas de instabilidade no fornecimento de eletricidade, sendo mesmo comum a existência de cortes de energia elétrica nas ilhas [13].

Tabela 1 – Matriz elétrica de Cabo Verde para o ano 2015. Fonte [11].

Fonte	Ilhas	Produção (MWh)	% por ilha	% total
Térmica (gasóleo, fuelóleo)	Santo Antão	11 712	3,11	79,47
	São Vicente	52 077	13,81	
	São Nicolau	5 964	1,58	
	Sal	35 936	9,53	
	Maio	2 626	0,70	
	Santiago	176 547	46,82	
	Fogo	12 260	3,25	
	Brava	2 575	0,68	
Eólica	Santo Antão	1 687	0,45	18,88
	São Vicente	19 045	5,05	
	Sal	18 776	4,98	
	Santiago	31 700	8,41	
Solar Fotovoltaica	Sal	2 173	0,58	1,65
	Santiago	4 034	1,07	

O arquipélago de Cabo Verde encontra-se numa fase de desenvolvimento, marcada por importantes mudanças na sua estrutura económica, com relevância para as perspetivas do forte crescimento do sector terciário, com especial ênfase para o sector doméstico, turismo e comercial/industrial/agrícola (Figura 1.2), bem como pelos investimentos públicos realizados em infraestruturas e equipamentos, que procuram reforçar a integração e coesão do território nacional [14].

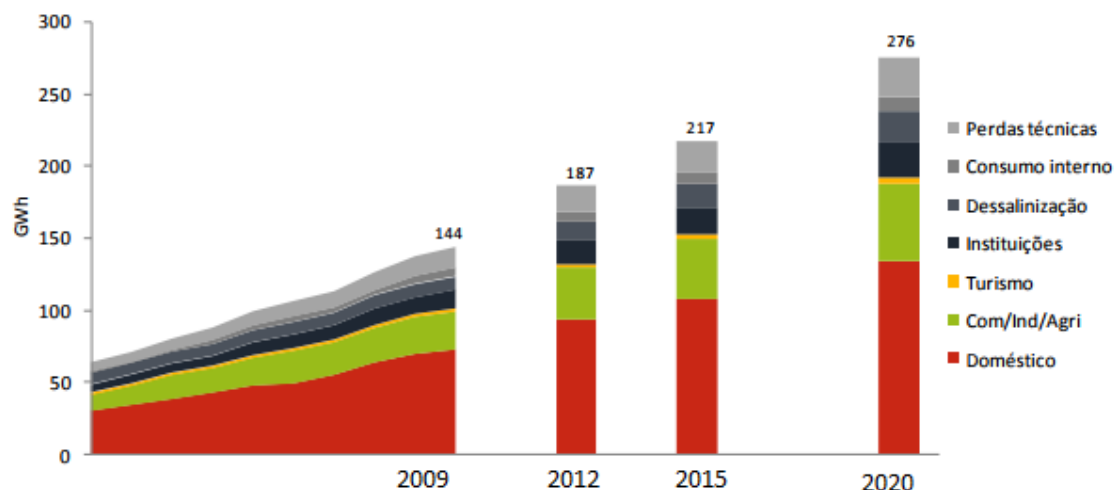


Figura 1.2 – Evolução da procura e a previsão para 2020. Fonte [14].

1.3. Energias renováveis em Cabo Verde

Com vista a encontrar soluções para o desenvolvimento sustentável do país foi elaborado o Plano Energético Renovável de Cabo Verde (PERCV¹) cujo principal objetivo é identificar e reservar as áreas com potencial para o desenvolvimento de projetos na área das energias renováveis. Dentro das políticas do setor energético, foram definidas as Zonas de Desenvolvimento das Energias Renováveis (ZDER²), zonas destinadas a acolher projetos de aproveitamento das energias renováveis nas seguintes áreas: solar, eólica, hídrica, geotérmica, resíduos sólidos urbanos e marítima [15].

Os recursos renováveis, eólico e solar fotovoltaico, são aqueles que mais abundam em Cabo Verde, e, atualmente, representam a totalidade do aproveitamento renovável para a produção da energia elétrica do país. A eólica representa a maior fatia com 90% e o solar fotovoltaico com os restantes 10% [16]. Dada a sua localização espacial, Cabo Verde encontra-se sobre influência dos ventos alísios, ventos bastante constantes provenientes de uma única direção, nordeste (NE), sendo esta característica fundamental do recurso eólico desta região que o torna num aproveitamento renovável bastante benéfico para o abastecimento elétrico do país [17].

A ELECTRA. SARL (empresa de eletricidade e água), em 1994, procedeu à instalação de três parques eólicos no arquipélago de Cabo Verde. Um parque na ilha do Sal com duas turbinas eólicas com uma potência de 300 kW cada e, outros dois parques nas ilhas de S. Vicente e Santiago com três turbinas eólicas, cada uma com 300 kW de potência. Estes parques são compostos por aerogeradores do fabricante *Nordtank* com regulação por passo fixo - “*Stall*” [18]. Nos finais de 2011, a Vestas assinou um contrato para o fornecimento de geradores eólicos que totalizaram uma capacidade de 25,5 MW para Cabo Verde, especificamente para o projeto desenvolvido pelo promotor Cabeólica, que incluiu a construção de quatro parques eólicos nas ilhas de Santiago, Sal, São Vicente e Boavista. A Vestas instalou um total de trinta turbinas eólicas de 850 kW de potência unitária (11, 9, 7 e 3 MW nas ilhas de Santiago, Sal, São Vicente e Boavista, respetivamente) numa parceria público/privada entre o governo de Cabo Verde e a ELECTRA & InfraCo [12]. Posteriormente, procedeu-se ao aumento da capacidade

¹ Plano Energético Renovável de Cabo Verde, elaborada pela Direção Geral de Energia de cinco em cinco anos.

² A definição das Zonas de Desenvolvimento de Energias Renováveis e a estimativa das suas respetivas potências passíveis de serem aproveitadas, para as diferentes tecnologias de aproveitamento renovável, para as 9 ilhas consideradas no estudo, teve em conta um conjunto de requisitos técnicos, legais, logísticos e ambientais.

instalada nos parques eólicos das ilhas de Santiago e São Vicente com a instalação de mais três turbinas eólicas em cada ilha. Desta forma, atualmente, Cabo Verde conta com uma capacidade instalada de eólica de 30,6 MW, espacialmente distribuída por quatro ilhas, Figura 1.3. As turbinas eólicas instaladas nos parques eólicos são do fabricante Vestas, do tipo V52 850 kW.

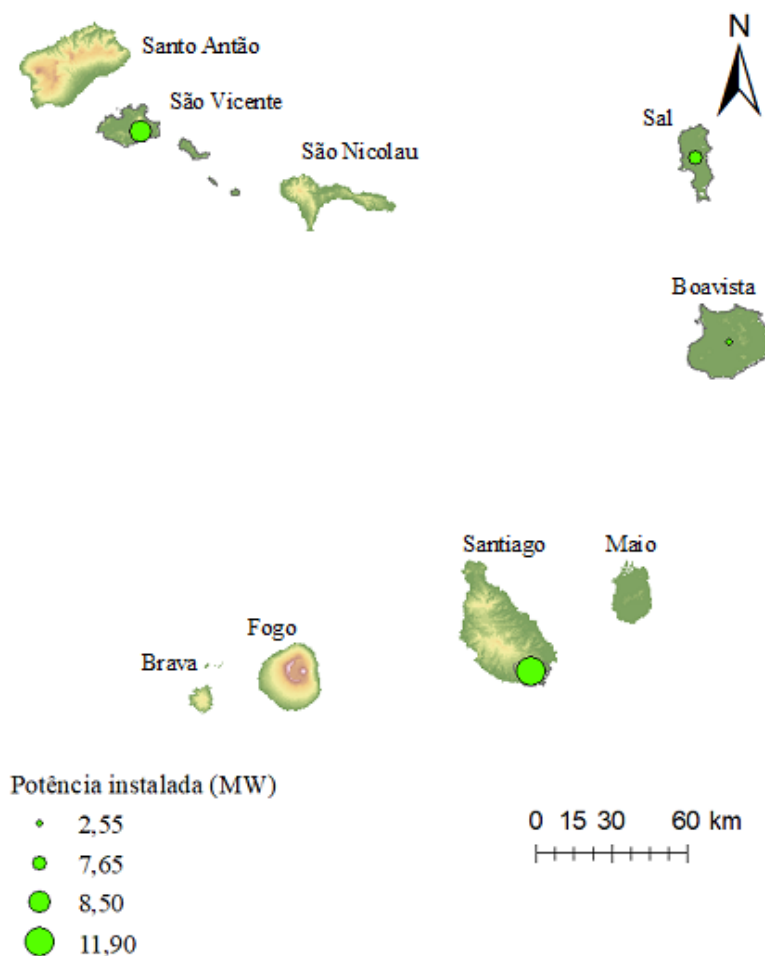


Figura 1.3 – A localização dos parques eólicos e as suas respetivas capacidades instaladas.

As localizações exatas dos referidos parques eólicos encontram-se apresentadas na seguinte tabela:

Tabela 2 – Localização e capacidade instalada em 2018, em MW, dos parques eólicos em operação no arquipélago de Cabo Verde.

	Ilha	Localização do parque eólico		Capacidade instalada (MW)
		Latitude	Longitude	
Parques eólicos	Santiago	14° 58'09,55"	23° 30'39,02"	11,90
	São Vicente	16° 50'02,17"	25° 01'14,31"	8,50
	Sal	16° 42'26,46"	22° 54'17,14"	7,65
	Boavista	16° 12'45,57"	22° 54'23,57"	2,55

1.4. Objetivos da dissertação

O procedimento para a construção do Atlas do Potencial Eólico aplicado nesta dissertação baseia-se na utilização de duas ferramentas principais: o modelo de simulação numérica de mesoescala – MM5 (desenvolvido na PSU/NCAR³) [19] e o Sistema de Informação Geográfica (SIG) - ArcGIS⁴ [20].

Embora atualmente se encontre disponível o mapeamento do recurso eólico mundial [21], onde naturalmente se insere Cabo Verde, este apresenta algumas limitações, nomeadamente: *i*) limitação/ausência no mapeamento das restrições geográficas, ambientais e sociais à instalação de parques eólicos; *ii*) ausência de calibração dos modelos de mesoescala para a região em análise; e *iii*) ausência de validação dos resultados numéricos [21]. Nesse sentido, este estudo visa a construção de um Atlas do potencial eólico para o arquipélago de Cabo Verde com elevada discretização espacial e temporal permitindo uma identificação fiável das regiões com Potencial Eólico Sustentável nas diferentes ilhas do arquipélago, isto é, regiões que respeitam as restrições existentes (*e.g.*, ambientais, sociais) e cujo investimento é economicamente viável. Esta avaliação pode constituir uma ferramenta crucial no auxílio de decisão, na definição de políticas energéticas bem como em futuros investimentos por parte de um promotor eólico, nomeadamente, em campanhas experimentais para a caracterização do escoamento atmosférico local de acordo com as boas práticas do sector eólico.

Relativamente à utilização das ferramentas, uma vez que, o modelo MM5 foi concebido para uma zona do globo com características muito distintas do local em estudo, torna-se necessário efetuar a calibração do modelo numérico para as condições atmosféricas típicas na região em estudo. Este procedimento é efetuado por via da comparação sincronizada dos dados experimentais observados nas estações meteorológicas com os dados extraídos do modelo numérico. Depois de efetuada a simulação numérica de mesoescala pretende-se proceder a validação dos resultados obtidos e à correção da variabilidade temporal do escoamento atmosférico. Por fim, é realizada a identificação dos locais com elevado Potencial Eólico, recorrendo à ferramenta SIG - ArcGIS.

³ Universidade Estadual de Pensilvânia/Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica. O MM5 originalmente desenvolvido para previsão meteorológica de curto prazo, este passou por muitas mudanças ao longo dos anos. Através de diferentes parametrizações e condições meteorológicas iniciais e de fronteira é possível utilizá-lo para diferentes locais do planeta com condições atmosféricas distintas.

⁴ ArcGIS – *software* que permite a visualização, análise e tratamento de informação georreferenciada.

1.5. Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

- ❖ No capítulo 1 é apresentado a contextualização da dissertação, o caso de estudo, a motivação e os objetivos do presente estudo.
- ❖ No capítulo 2 apresentam-se alguns estudos sobre o planeamento do aproveitamento da energia eólica mais relevantes para a definição da metodologia e do caso de estudo do presente estudo. Estes estudos incidem sobre a *i)* identificação do potencial eólico recorrendo a modelos de mesoescala/microescala e *ii)* aplicação de ferramentas SIG no planeamento do aproveitamento de energias renováveis. São apresentados dois estudos da identificação do potencial eólico nomeadamente, o Atlas global do vento e o mapeamento do recurso eólico existente para o arquipélago de Cabo Verde.
- ❖ O capítulo 3 descreve, de forma sucinta, os fundamentos teóricos associados ao recurso primário da energia eólica – vento, onde são abordadas as circulações desde a escala global à pequena escala (circulações locais). Uma vez que o processo da identificação do potencial eólico sustentável baseia-se no modelo numérico MM5 e no *software* ArcGIS, neste capítulo apresenta-se igualmente uma abordagem sucinta do modelo numérico MM5 e dos aspetos mais relevantes da análise de dados no ArcGIS.
- ❖ A metodologia aplicada na presente dissertação é descrita detalhadamente no capítulo 4. A metodologia encontra-se dividida em duas partes, a primeira possui os passos necessários para a construção do Atlas do vento através do modelo numérico MM5. A segunda parte corresponde à metodologia para a identificação do potencial sustentável, com base na análise de dados no ArcGIS.
- ❖ O capítulo 5 é dedicado aos resultados obtidos. Neste capítulo é apresentado o Atlas do vento obtido, ou seja, os mapas do campo médio da velocidade do vento e a sua direção para duas alturas distintas, 52 e 80 metros. Também são apresentados os resultados correspondentes ao potencial eólico sustentável disponível para exploração para todas as zonas administrativas de Cabo Verde.

As informações adicionais inerentes à metodologia aplicada e aos resultados obtidos encontram-se apresentados em anexo:

- anexo A – calibração das parametrizações físicas do modelo MM5;
- anexo B – análise da variabilidade do recurso eólico;
- anexo C – mapeamentos dos declives do terreno para cada ilha;
- anexo D – mapeamentos da densidade populacional;
- anexo E – mapeamentos dos acessos e das zonas protegidas e dos parques eólicos existentes em Cabo Verde;
- anexo G – mapeamentos das restrições ambientais e de terreno;
- anexo F – mapeamentos dos parâmetros de Weibull (A e k) para as alturas de 52 e 80 metros.

2. Planeamento do aproveitamento da energia eólica

Nesta secção é apresentada uma breve revisão de literatura sobre a utilização de modelos numéricos de mesoescala como ferramenta de simulação do recurso eólico, bem como a utilização de ferramentas SIG para o planeamento do aproveitamento da energia eólica.

2.1. Mapeamento do potencial eólico

Para se obter séries de vento representativas de um local, ou realizar um mapeamento regional e/ou nacional - sem recurso direto a uma rede extensa e onerosa de estações anemométricas - torna-se necessário utilizar modelos numéricos atmosféricos, vulgarmente denominados por modelos de mesoescala. Estes modelos têm a capacidade de descrever o comportamento e evolução das massas de ar e tratar de forma explícita, os fenómenos inerentes da turbulência e estratificação atmosférica. O modelo numérico é capaz de descrever todos esses fenómenos atmosféricos e outros de natureza não linear, até à resolução máxima espacial de 1x1 km [19]. Este procedimento era de difícil realização no início dos anos 80, dada a escassez de modelos numéricos capazes de lidar com a turbulência atmosférica e outros fenómenos na camada limite, tais como os efeitos de brisa e de concentração orográfica. Com o desenvolvimento da capacidade computacional e a aposta das instituições de ensino, nomeadamente universidades e até instituições governamentais de investigação, os modelos de simulação aplicados na identificação do potencial eólico a diferentes escalas temporais e espaciais tem-se desenvolvido cada vez mais. Adicionalmente, estes modelos têm beneficiado da instalação de novos equipamentos de observação/medição dos parâmetros meteorológicos proporcionando um forte contributo na melhoria da sua capacidade de reproduzir as dinâmicas atmosféricas de uma região. Recorrendo a este tipo de modelação, a literatura atual, identificaram-se dois Atlas especialmente relevantes na região em análise, e que são apresentados e discutidos em mais detalhe nas secções seguintes.

2.1.1. Atlas Global do vento

O Atlas Global do Vento [21] fornece dados globais que descrevem o recurso eólico nomeadamente a velocidade média do vento e a densidade de potência, com uma resolução espacial até 1 km. De acordo com os autores, o Atlas Global do Vento tem como objetivo [21]:

- Fornecer dados do recurso eólico de alta resolução para todo o globo;
- Utilizar uma modelação em microescala de forma a captar a variabilidade em pequena escala da velocidade do vento;
- A utilização de uma única metodologia para todo o globo;
- Garantir a transparência da metodologia utilizada.

A metodologia da construção do Atlas Global do Vento consiste num processo encadeado constituído por processamento de dados de vento desde a grande escala (dados com uma baixa resolução espacial) até à pequena escala (elevada resolução espacial). Os dados de larga escala são provenientes de projetos de reanálises⁵.

⁵ Dados históricos que são obtidos através do ajustamento dos dados observados/inferidos (estações meteorológicas, satélites, boiás, etc., distribuídos por todo o planeta) à física de um modelo numérico.

De acordo com [22], atualmente, várias instituições, já disponibilizam gratuitamente informações contidas em projetos reanálises. A título de exemplo, em [21], o atlas é baseado em dados provenientes de projetos de reanálises, que são utilizados como dados de entrada para a modelação em microescala recorrendo-se a modelos de fluxo, nomeadamente o WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*). As estimativas apresentadas são assim resultado desse processo encadeado, cujas fontes primárias neste caso, foram os dados das reanálises do projeto MERRA2 - (*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications*) disponibilizados pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). O resultado da aplicação desta metodologia encontra-se representado na Figura 2.1 [23].

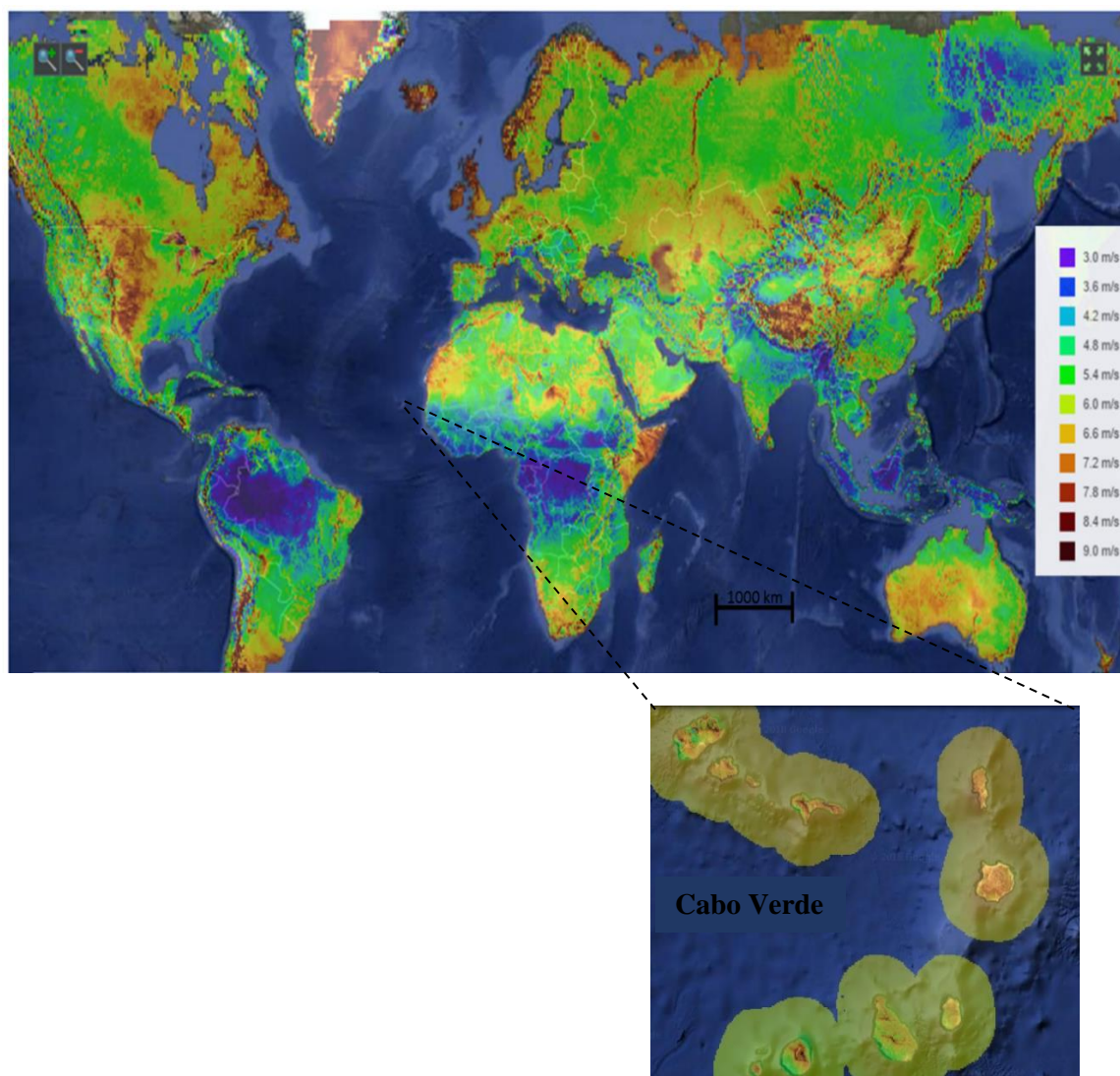


Figura 2.1 – Mapa da velocidade média do vento a 50 metros de altura. Fonte [23].

O atlas global do vento apresentado na Figura 2.1 usa o modelo de fluxo orográfico incluído no WAsP. Este modelo possui uma elevada performance quando o terreno circundante não apresenta uma elevada complexidade, o que não acontece no caso de Cabo Verde.

Pode-se constatar na Figura 2.2 um outro mapa do Atlas Global do Vento [24], baseado em dados provenientes do projeto de reanálises Era-Interim [25] com uma resolução espacial de 9 quilómetros.

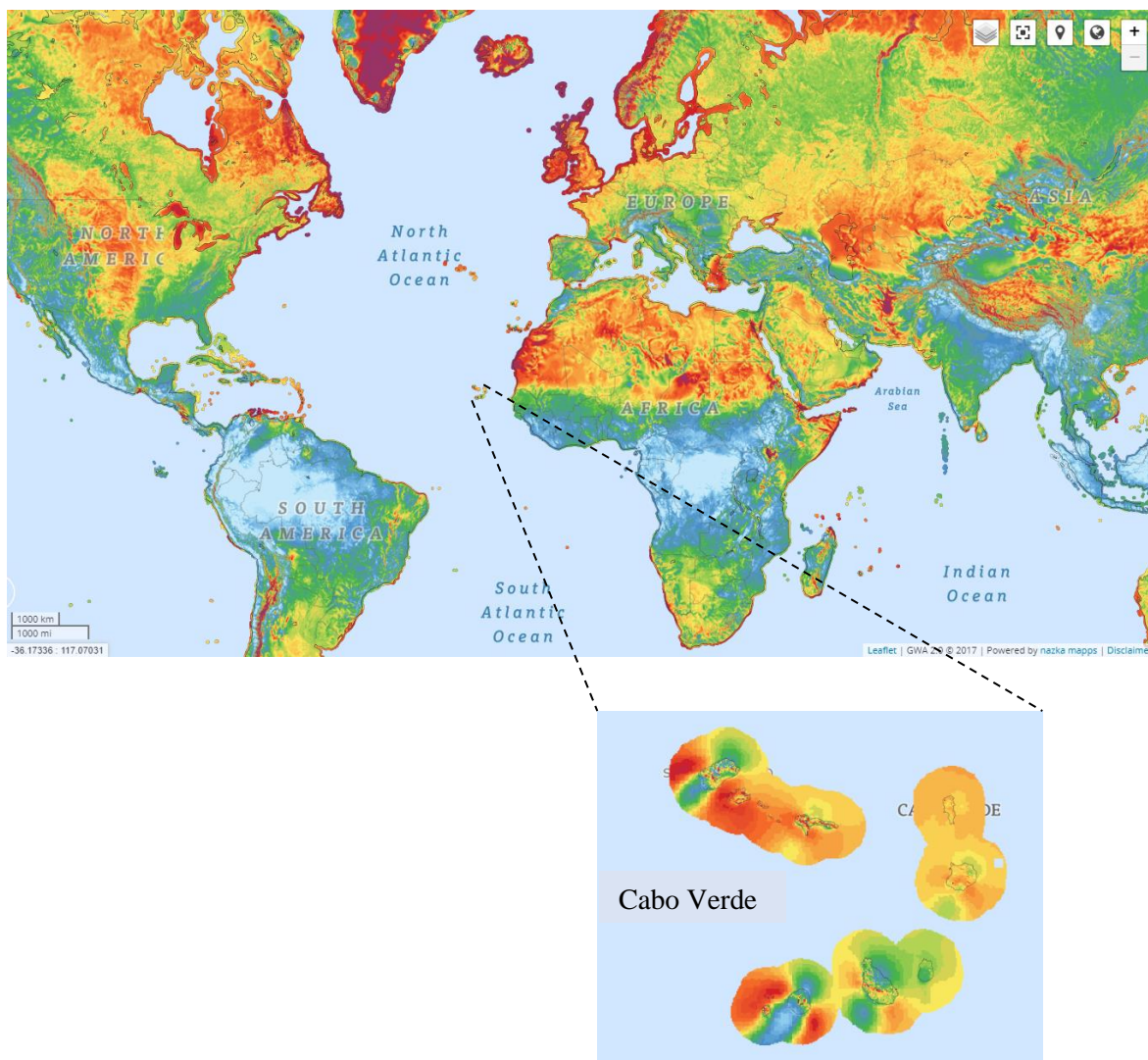


Figura 2.2 – Mapa do Atlas Global do Vento para uma altura de 100 metros. Fonte [24].

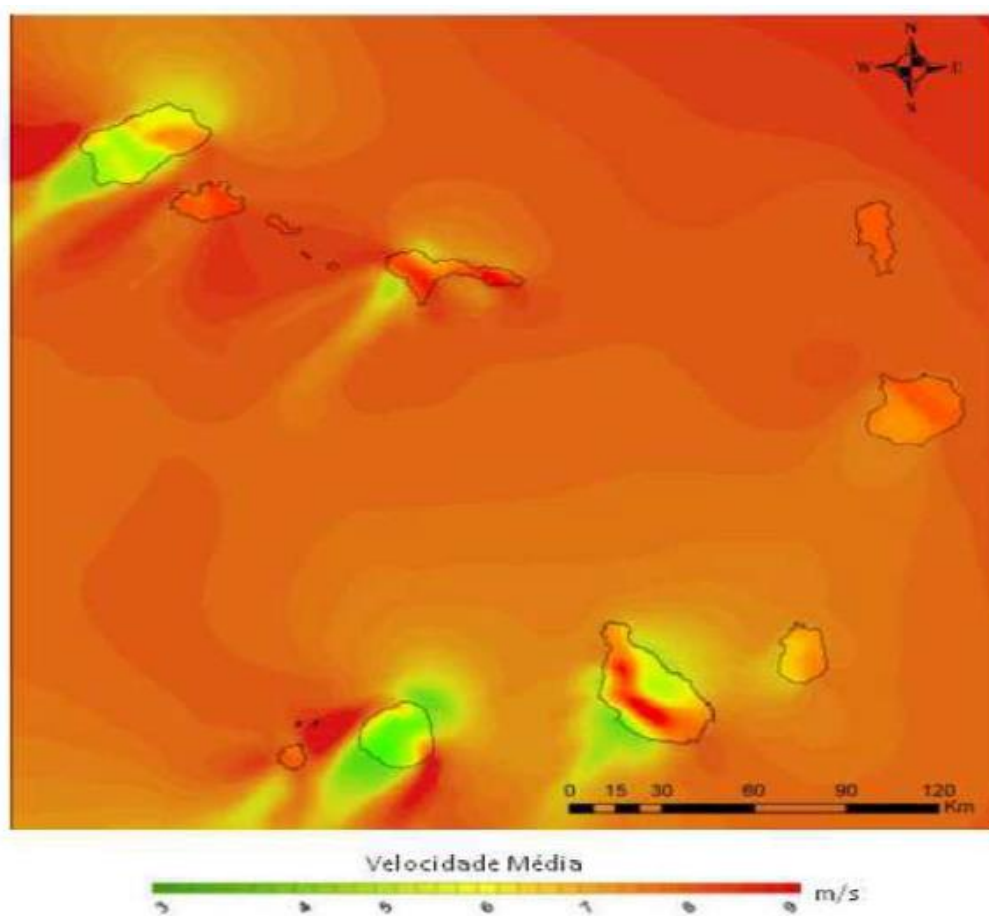
A informação contida no atlas global de vento deve ser usada pelos promotores de energia e decisores políticos como ferramenta de suporte para análise e modelação da integração da energia eólica na rede elétrica. No entanto, essa informação é insuficiente para concluir que existem condições locais para a implementação de parques eólicos. De facto, o atlas global do vento, apesar de fornecer valores estatísticos do vento para todo o mundo, possui limitações (*e.g.*, a ausência de validação de resultados, etc. [21]), pelo que torna-se crucial o desenvolvimento e validação de Atlas nacionais do recurso eólico para cada país. Desta forma, e de acordo com [21], as principais motivações para a realização de atlas nacionais são:

- Ausência da componente de modelação em mesoescala;
- Introdução das variações espaciais e temporais que não são resolvidas numericamente nas reanálises;
- A modelação em mesoescala aumenta a precisão do atlas, com a inclusão fenómenos locais como por exemplo brisas do mar de montanha, etc.;
- Inclusão da modelação do componente de microescala aprimorado;
- A melhoria de dados globais do terreno através do conhecimento específico do país;
- O envolvimento dos parceiros locais, nomeadamente, promotores e decisores políticos;

- Validação dos resultados através de dados existentes para as cotas típicas das turbinas eólicas (por exemplo, 80m) de elevada qualidade e fiabilidade.

2.1.2. Estudos realizados para Cabo Verde

Para além do atlas global do vento, o único estudo dedicado ao desenvolvimento da avaliação do potencial eólico no arquipélago de Cabo Verde foi feito pelo laboratório nacional dinamarquês (*RisØ*) [13], com recurso ao modelo WAsP, tendo como base observações em altitude registadas em estações meteorológicas, nos seguintes locais: Selada do Flamengo e Selada de São Pedro, na ilha de São Vicente, Monte de São Filipe, na ilha de Santiago, Palmeira, na ilha do Sal e Sal-Rei, na ilha da Boavista. Da aplicação do modelo obteve-se o mapa representado na Figura 2.3.



do potencial eólico disponível nas ZDER é a Vestas V52 de 850 kW, turbina esta que se encontra instalada nos quatro parques eólicos do país.

Tabela 3 – Zonas de Desenvolvimento para Energias Renováveis. Fonte [13].

Ilhas de Cabo Verde	ZDER por zona	Localidade	Potência [MW]
Santiago	ZDER.ST.1	Terras altas	96,90
	ZDER.ST.2	Praia Baixo	6,80
	ZDER.ST.3	Monte da Chaminé	5,95
Sal	ZDER.SL.1	Cascanhal	38,25
Fogo	ZDER.FG.1	Cova Figueira	17,85
	ZDER.FG.2	Monte Ledo	1,70
Santo Antão	ZDER.SA.1	Lombo da Torre	11,05
	ZDER.SA.2	João Daninha	11,05
	ZDER.SA.3	Galheteiro	12,75
São Vicente	ZDER.SV.1	João D'Évora	10,20
	ZDER.SV.2	Areia Branca	7,65
	ZDER.SV.3	Pé de Verde	2,50
São Nicolau	ZDER.SN1	Jalunga	14,45
Boavista	ZDER.BV1	Picos da Boavista	20,40
Maio	ZDER.MA1	Batalha	14,45
Brava	ZDER.BR1	Furna	5,95

Na Figura 2.4 pode-se observar a distribuição da potência disponível para a exploração de acordo com o identificado para as ZDER.

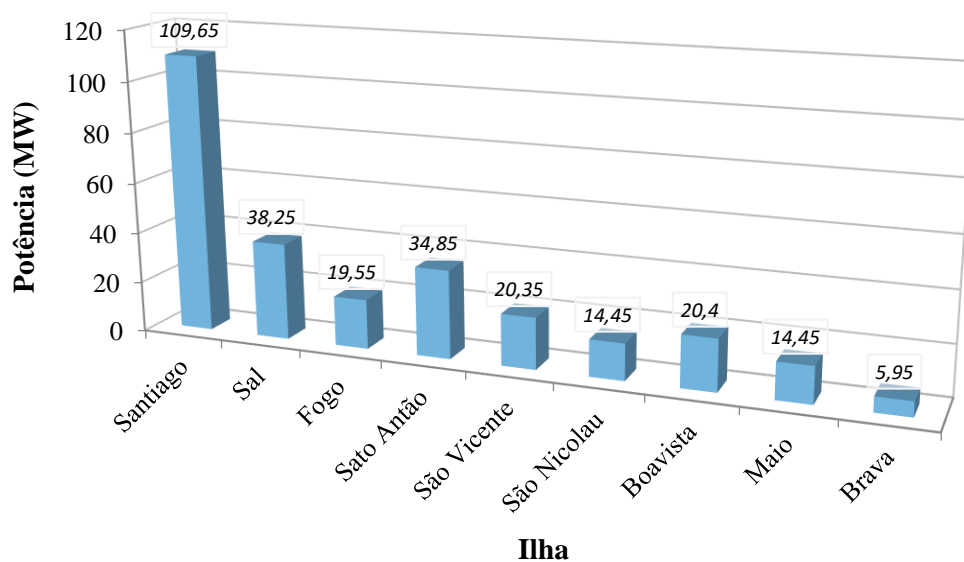


Figura 2.4 – Potência disponível para a exploração em cada Ilha, definidas segundo as Zonas de Desenvolvimento para Energias Renováveis (ZDER). Fonte [13].

2.2. A utilização dos Sistemas de Informação Geográfica

Os programas e modelos utilizados na fase de caracterização do potencial eólico aceitam e requerem vários tipos de informação. Os resultados obtidos por cada um destes programas são também apresentados em diversos formatos. Face ao exposto, é necessário converter e adaptar a informação já existente e, posteriormente, converter nos formatos reconhecidos pelo SIG. Este procedimento permite estruturar a informação para introdução dentro de uma base de dados de forma a possibilitar consultas rápidas e eficazes [27].

São vários os estudos efetuados, onde se fez uso das ferramentas SIG para melhor avaliar e identificar o potencial dos recursos renováveis, nomeadamente eólico e solar. Como exemplo do uso das ferramentas SIG no planeamento da energia eólica, podem destacar-se os seguintes trabalhos:

- ❖ A identificação do potencial eólico sustentável *offshore* em Portugal Continental [28]. Este estudo consistiu na identificação do potencial eólico *offshore* tendo por base os dados do modelo numérico MM5 com resolução espacial de 5x5km, bem como as áreas adequadas para a instalação de parques eólicos. Esta identificação foi realizada recorrendo a ferramentas SIG.
- ❖ Uma metodologia de identificação do potencial eólico sustentável – caso de estudo: Portugal. Utilizaram-se ferramentas SIG de forma a analisar e manipular a informação requerida [29].
- ❖ As ferramentas de suporte ao planeamento e integração das energias renováveis a nível regional - caso de estudo – Escócia, Espanha e Portugal. Neste estudo foi usado SIG para analisar a proximidade dos parques eólicos aos pontos de conceção da rede elétrica [30].
- ❖ Atlas do Irão para as energias renováveis *offshore*, onde foram analisados os locais ideais para implementação de sistemas de energias renováveis [31].
- ❖ Avaliação baseada em SIG dos parques eólicos na Índia. Foi feito o mapeamento do potencial eólico dos parques eólicos recorrendo a uma ferramenta SIG, sendo esta, uma abordagem fiável para a avaliação do potencial eólico [32].
- ❖ Aplicação de ferramentas SIG para a eletrificação rural com fontes de energias renováveis. Este estudo foi feito para Múrcia (Espanha) onde foram identificados os locais apropriados à instalação de fontes de energias renováveis com o objetivo de colmatar a escassez de energia elétrica nas zonas rurais [33].
- ❖ Identificação dos melhores locais para projetos de aproveitamento de energia eólica junto das comunidades, na zona Oriental de Massachusetts (USA) [34]. Recorrendo a uma ferramenta SIG, este estudo consistiu na identificação de zonas onde, ao mesmo tempo, se verifica uma elevada densidade populacional e uma velocidade do vento suficientemente alto de forma que a instalação de uma turbina eólica seja economicamente viável. Os principais procedimentos aplicados pelos autores encontram-se esquematizado na Figura 2.5.

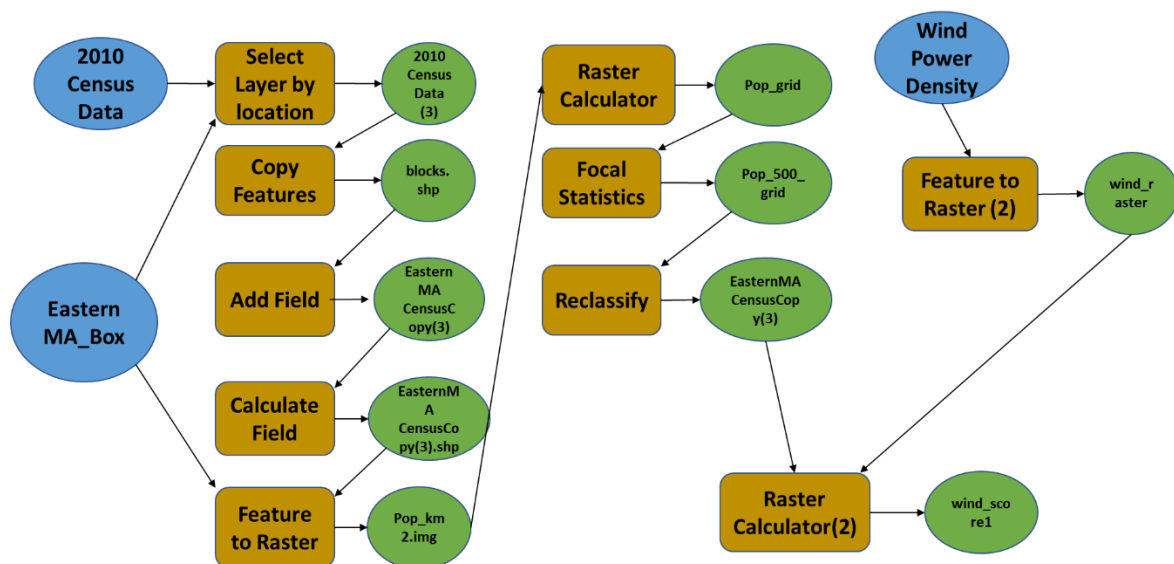


Figura 2.5 - Representação esquemática dos processos inerentes à avaliação da adequação da zona oriental de Massachusetts. Fonte [34].

3. Fundamentos teóricos

3.1. O escoamento atmosférico

Neste tópico pretende-se abordar, de forma sintetizada, a circulação do vento em torno do planeta terra, caracterizando os diferentes tipos de origem do vento e a sua influência na caracterização da energia do escoamento atmosférico. Neste sentido, é descrita a variabilidade do escoamento sobre a superfície da terra resultante dos fenómenos ocorridos em escalas temporais e espaciais com dimensões distintas. Nesta secção apresenta-se igualmente uma breve descrição das condições climáticas observadas na região em análise.

3.1.1. Circulação global atmosférica

Hoje em dia existem equipamentos e ferramentas para a medição do vento e das suas características por todo o globo, mas muito antes de haver esses instrumentos e o estabelecimento destas redes de observações, as características fundamentais da circulação geral da atmosfera foram identificadas por George Hadley em 1735 [35]. Hadley defendeu o primeiro modelo de circulação baseado numa única célula onde se considerava três pressupostos essenciais: a superfície do globo é coberta uniformemente por água (não considerando a diferença entre o calor da superfície sobre o mar e o calor da superfície continental); o sol encontra-se direcionado sempre para o equador, não existindo variação sazonal devido à inclinação da terra, bem como, a inexistência do movimento rotativo da terra. Com esses pressupostos a única força existente era a força do gradiente de pressão. Esta circulação passou a ser designada por célula de Hadley, com subida do ar quente no equador, desencadeado pela energia solar, e descida de ar frio nos polos. Assim, de acordo com [35], o aquecimento sobre o equador origina a criação de uma região ampla de sistemas depressionários (baixa pressão), enquanto que, nos polos, o excesso de arrefecimento cria uma região de alta pressão. Consequentemente, e como resposta ao gradiente horizontal de pressão, o ar na superfície polar fria desloca-se para o equador, e, simultaneamente, nos níveis mais elevados da atmosfera, o ar flui para os polos.

Dadas as limitações dos pressupostos considerados por Hadley, William Ferrel introduziu de maneira correta (científica e fisicamente) os efeitos da rotação da Terra na descrição da circulação global da atmosfera. Ferrel não só derivou uma expressão correta do efeito Coriolis no movimento de uma partícula de ar, como também, alcançou uma correta compreensão matemática e física da deflexão associada aos movimentos de rotação da terra e as suas consequências para o fluxo atmosférico [36]. Neste caso, a redistribuição de energia na circulação global da atmosfera é assegurada por três células em vez de uma – modelo tricelular. Assim, foi possível obter uma justificação para a existência de uma zona intertropical de convergência (ZITC) onde o vento entre os trópicos converge para a linha do equador como se pode observar de forma clara na Figura 3.1 e duas características adicionais da circulação global: a existência de duas zonas de vento muito intenso de Oeste, em altitude – as correntes de Jato – e a existência de uma zona de forte gradiente de temperatura nas latitudes médias – a frente Polar. Devido à presença da orografia e rugosidade na superfície do globo, o modelo de Ferrel não tem as características de simetria hemisférica e axial apresentadas na Figura 3.1.

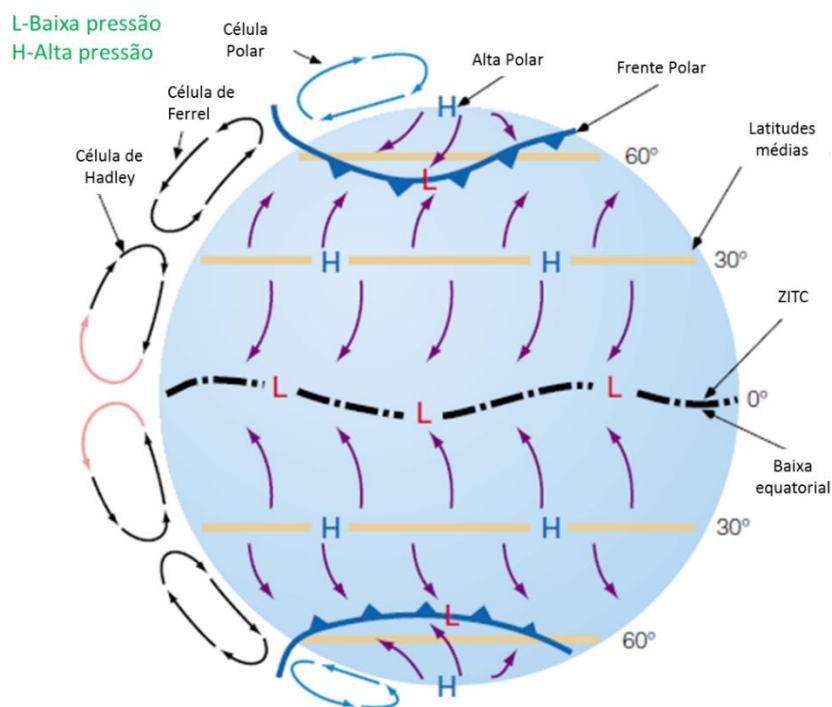


Figura 3.1 – Distribuição idealizada do vento e da pressão sobre a superfície da terra rotativa, uniformemente coberta de água [35].

Na superfície da terra existem duas regiões de alta pressão sendo estas perto dos 30° de latitude e nos polos, e duas regiões de baixa pressão, sendo estas sobre o equador e perto dos 60° de latitude na vizinhança da frente polar. Uma vez que Cabo Verde se localiza numa latitude de cerca de 16° Norte, o arquipélago é fortemente influenciado pelos ventos alíseos oriundos de Nordeste (NE).

3.1.1.1. As forças que influenciam a circulação global da atmosfera

O movimento das massas do ar na atmosfera é causado pela coexistência de diferentes fenómenos como é a aceleração da gravidade, a diferença de pressão, o aquecimento desigual do planeta, a influência do relevo existentes nas massas continentais e o efeito da rotação da terra. Assim, as forças que influenciam esse movimento são: *i*) a força do gradiente de pressão - faz com que uma partícula do ar se movimente de regiões de alta pressão para regiões de baixa pressão, *ii*) a força de Coriolis resultante do movimento de rotação da terra e faz com que a partícula do ar em movimento se desloque para a direita no hemisfério Norte e para a esquerda no hemisfério Sul, *iii*) a força de atrito que atua na direção contrária a direção do movimento e *iv*) a força centrífuga motivada pelo movimento circular em torno das zonas de baixa pressão (ciclones) e de alta pressão (anticiclones), respetivamente. Nas subseções seguintes é explorado o impacto destas forças no movimento horizontal do escoamento atmosférico.

3.1.1.2. Vento geostrófico

A descrição da evolução da circulação atmosférica baseia-se nas leis da Dinâmica aplicadas a um fluido. Neste caso, tratando-se de uma partícula do ar, o movimento é dado pela resultante das forças que atuam sobre essa partícula e é traduzido pela segunda lei de Newton – lei da variação da quantidade de movimento:

$$\vec{F}_r = \frac{d(m\vec{v})}{dt} \quad (3.1)$$

onde \vec{F}_r é a resultante das forças que atuam sobre a partícula de ar e $m\vec{v}$ representa a quantidade de movimento.

A circulação geostrófica consiste em considerar um escoamento horizontal, uniforme e retilíneo, sem atrito. Esta aproximação, fisicamente relevante, fornece uma boa aproximação do vento observado longe da superfície. Sendo o escoamento uniforme, não existe aceleração tangencial, e ao mesmo tempo, sendo retilíneo, o raio de curvatura é infinito não existindo aceleração centrípeta. Deste modo, a equação do movimento limita-se a traduzir o equilíbrio entre a força desencadeada pelo gradiente de pressão (\vec{F}_p) e a força de Coriolis (\vec{F}_{co}):

$$\vec{F}_p + \vec{F}_{co} = 0 \Rightarrow f v - \frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta n} = 0 \quad (3.2)$$

$$v = -\frac{1}{\rho f} \frac{\Delta p}{\Delta n} \quad (3.3)$$

$$f = 2\Omega \sin \varphi \quad (3.4)$$

Sendo f o parâmetro de Coriolis, sendo Ω a velocidade angular da terra, $\Omega = 7.29 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$, φ a latitude do local, ρ a densidade do ar, Δp a diferença de pressão de duas isóbaras contíguas e Δn a menor distância entre elas. A condição imposta pela equação (3.2) denomina-se pelo equilíbrio geostrófico e o seu valor é dado pela equação (3.3).

O equilíbrio geostrófico pode ser visualizado na Figura 3.2 numa região da atmosfera onde existe um gradiente horizontal de pressão constante [37].

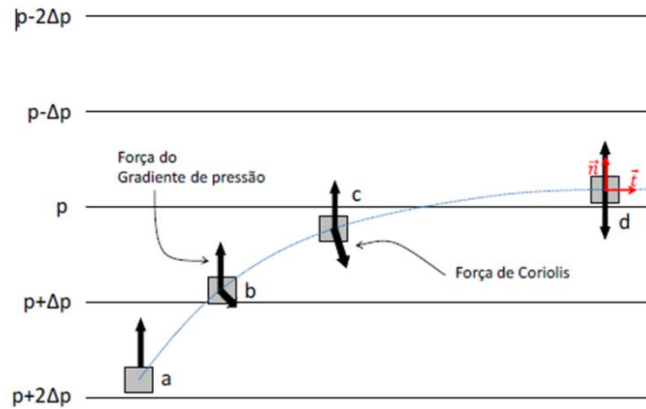


Figura 3.2 – Estabelecimento do equilíbrio geostrófico numa atmosfera com um gradiente horizontal de pressão (para hemisfério Norte). Figura extraída de [37].

Através da Figura 3.2 pode-se observar uma partícula na posição a , em repouso, sujeita a uma única força correspondente à força do gradiente de pressão. Esta força do gradiente de pressão faz com que a partícula de ar acelere na mesma direção e sentido dessa força, em direção a pressões mais baixas. Na posição b , a partícula de ar é afetada não só pela força gradiente de pressão que se mantém constante ao longo de todo o percurso desde o ponto a (alta pressão) até o ponto de baixa pressão (ponto d), mas também pela força de Coriolis, uma vez que a partícula se movimenta a uma certa velocidade. Uma vez que, a força de Coriolis é perpendicular ao vetor velocidade, esta obriga a partícula a seguir a trajetória curvilínea desde o ponto a até o ponto d , como mostra a Figura 3.2. O desequilíbrio entre as duas forças, forças de gradiente de pressão e de Coriolis, faz com que haja aceleração da partícula ($\frac{d\vec{v}}{dt} > 0$). Como a

intensidade da força de Coriolis vai sempre aumentando, é eventualmente atingida uma situação de equilíbrio (ponto d) em que as duas forças são exatamente simétricas e a trajetória da partícula é paralela às isóbaras [37].

3.1.1.3. Vento do gradiente

O campo da pressão observado é raramente semelhante ao da Figura 3.2 uma vez que as isóbaras reais são curvas, sendo por vezes curvas fechadas de grande curvatura em torno de zonas de máximo (anticlones) e mínimo (depressão) de pressão atmosférica. Quando as isóbaras são curvas a solução do vento geostrófico deixa de ser uma boa aproximação, sendo assim necessário a inclusão do efeito da força centrífuga para o estabelecimento de uma situação de equilíbrio estacionário, *i.e.*, aceleração tangencial nula ($\frac{d\vec{v}}{dt} \cdot \vec{u}_t = 0$). Este equilíbrio é traduzido da seguinte forma:

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_p + \vec{F}_{co} + \vec{F}_{cf} = 0 \Rightarrow \vec{F}_p + \vec{F}_{co} - \frac{v^2}{R} \vec{u}_n = 0 \quad (3.5)$$

onde R é o raio de curvatura da partícula ao centro do sistema e \vec{F}_{cf} é a força centrífuga por unidade de massa ($-\frac{v^2}{R} \vec{u}_n$) associada à rotação da partícula do ar no plano horizontal e \vec{u}_n corresponde à componente normal da velocidade da partícula de ar. Este termo, por ter um sentido contrário à força centrípeta, dirigida para o exterior da curva descrita pelas isóbaras, apresenta sinal negativo. Dado que os centros de ação se constituem por anticlones ou depressões, implica que a força do gradiente de pressão seja de sentido inverso para cada tipo de sistemas. Neste caso, obtém-se uma solução individualizada para cada sistema no hemisfério norte, sendo as soluções obtidas:

❖ para um anticlone,

$$v = \frac{fR}{2} - \sqrt{\left(\frac{fR}{2}\right)^2 - \frac{4}{\rho R} \frac{\Delta p}{\Delta n}} \quad (3.6)$$

❖ para uma depressão ou ciclone,

$$v = -\frac{fR}{2} + \sqrt{\left(\frac{fR}{2}\right)^2 + \frac{4}{\rho R} \frac{\Delta p}{\Delta n}} \quad (3.7)$$

A aproximação do vento do gradiente é aplicável a sistemas estacionários nas latitudes médias e elevadas e na troposfera livre, isto é, longe da superfície. As soluções físicas apresentadas nas equações (3.6) e (3.7) para o vento do gradiente, foram obtidas essencialmente pelo uso da força de Coriolis e este princípio só é válido quando se considera movimentos de escala sinótica, onde a força de Coriolis é muito superior à força centrífuga [37].

Os sistemas de pequena escala ou elevada velocidade podem atingir estados de equilíbrio estacionário com valores elevados do gradiente horizontal de pressão a ser compensados por valores igualmente elevados da força centrífuga, sendo desprezável o efeito de Coriolis. Este equilíbrio é designado por vento ciclostrofico, correspondendo ao equilíbrio entre a força do gradiente de pressão e a força centrífuga:

$$v = \sqrt{\frac{R \Delta p}{\rho \Delta n}} \quad (3.8)$$

3.1.1.4. Efeito do atrito

As soluções para o vento geostrófico e do vento gradiente podem ser facilmente modificadas para entrar em linha de conta com a representação do efeito do atrito. Admitindo que existe equilíbrio entre as forças de atrito, de Coriolis e a força gradiente de pressão e que as isóbaras são retas paralelas, devido ao efeito do atrito (comumente aceite como força oposta à deslocação do escoamento), pode facilmente concluir-se pela Figura 3.3 que o vento deixa de ser paralelo às isóbaras, atravessando-as no sentido das baixas pressões. Assim, na zona da atmosfera próxima da superfície, a existência do efeito de atrito provoca a convergência horizontal de ar e movimento ascendente nos centros de baixas pressões, e a divergência horizontal de ar, e, consequentemente, movimento descendente no caso dos centros de altas pressões (Figura 3.3). Deste modo, os fenómenos meteorológicos de convergência e divergência do ar permitem compreender as condições frequentes de céu limpo ou pouco nublado nos Anticiclones e nebulosidade ou precipitação nas Depressões.

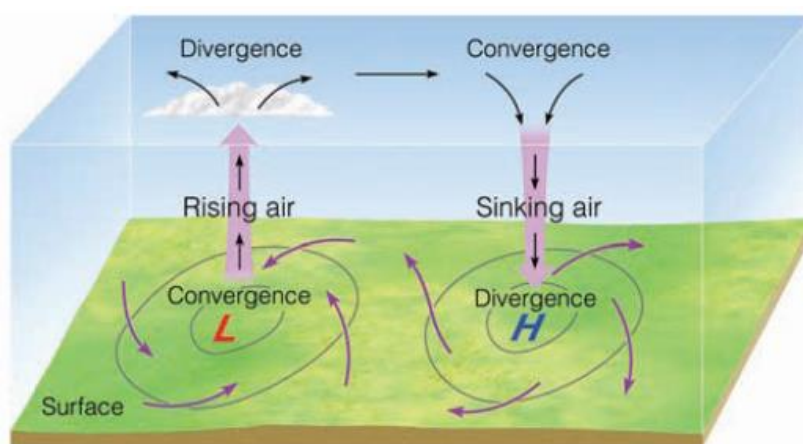


Figura 3.3 – Efeito da força de atrito num regime ciclónico e anticiclónico. Fonte [38].

A fricção exerce um importante papel na redistribuição do ar na atmosfera, principalmente quando consideramos o movimento do ar ao redor dos centros de baixa e alta pressão na superfície (Figura 3.3), isto é, nos ciclones e anticiclones.

3.1.2. Circulações locais

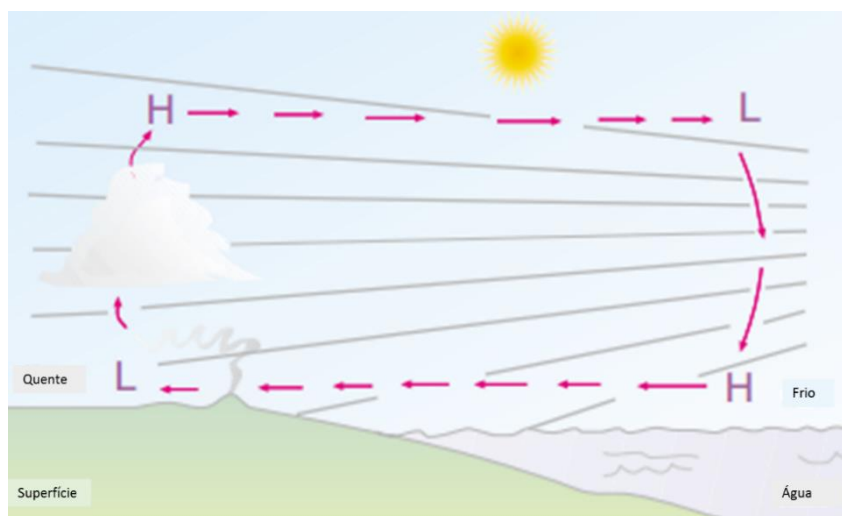
No subcapítulo 3.1.1. - Circulação global da atmosfera, as soluções analíticas foram obtidas para sistemas de escala sinótica (dimensão horizontal de 2000 a 10000 km e escala temporal entre dias e semanas). Do ponto de vista da “engenharia do vento”, para fins do aproveitamento do recurso eólico interessa conhecer o comportamento do vento numa camada junto da superfície terrestre até aos 200m de altura (atual altura máxima das turbinas eólicas). Nesta camada da atmosfera, a superfície terrestre tem particular interesse, porque é constituído por orografia/mar, vegetação/rugosidade e condicionantes locais, por exemplo, as casas, construções e obstáculos, sendo estes efeitos os principais responsáveis pela geração de circulações locais de vento.

As circulações locais de ar são induzidas termicamente pelos processos de superfície em regiões heterogênea e representam o resultado da transferência de calor, e humidade, da superfície para a camada limite atmosférica. Em algumas regiões, as propriedades da superfície apresentam variações abruptas que podem originar circulações organizadas, sendo estas capazes de afetar o clima local. As circulações provocadas pelas diferenças de temperaturas do ar, em que o ar quente sobe nas zonas de alta pressão e o ar frio desce nas zonas de baixa pressão são denominadas de circulações térmicas. Estas circulações

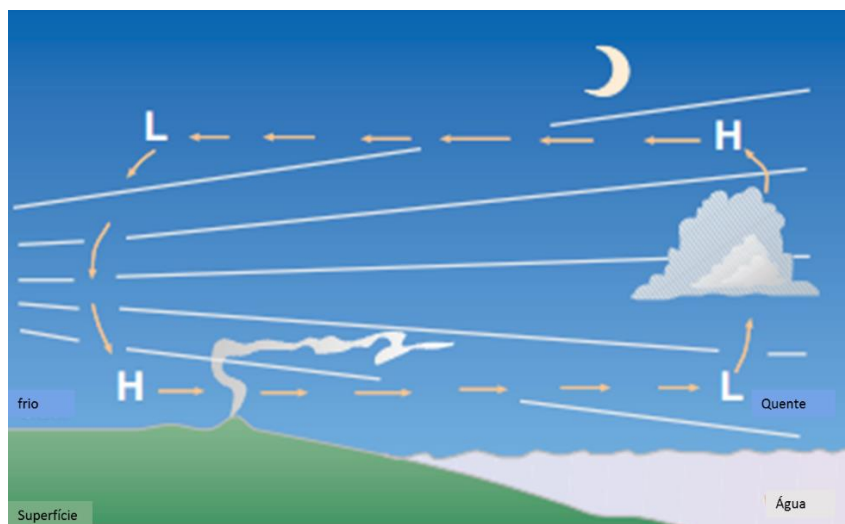
geralmente apresentam dimensões espaciais reduzidas, que se enquadram numa escala espaciotemporal associadas aos sistemas de mesoescala e/ou microescala.

3.1.2.1. Brisa marítima e terrestre

A causa fundamental do movimento do ar é a diferença de aquecimento entre as superfícies da terra e do mar, essencialmente devido às diferentes capacidades caloríficas do solo e da água. A água tem uma maior capacidade calorífica que o solo, e aquece muito mais lentamente que este, impedindo assim, a ocorrência de grandes oscilações térmicas durante o ciclo diurno associadas à radiação solar. Por outro lado, sobre os continentes o calor específico é mais baixo, conduzindo a oscilações térmicas diurnas maiores que à superfície dos oceanos o que faz com que os continentes, quando expostos a radiação solar, sejam mais quentes que os oceanos durante o dia. Desta forma, estão reunidas as condições para o desenvolvimento de brisas nas regiões costeiras dos continentes. A brisa marítima desenvolve-se, num dia de sol, quando a temperatura do solo continental é mais elevada que a da superfície do mar. À medida que o solo aquece, o ar na sua vizinhança expande-se, torna-se menos denso e começa a subir na atmosfera. Para substituir este ar em movimento ascendente surge uma deslocação à superfície do ar sobre o oceano na direção da costa. Durante a noite, a superfície do oceano não arrefece tanto como o continente e a circulação inverte-se, verificando-se o deslocamento do ar à superfície, dirigido do continente para o mar. Esta circulação denomina-se de brisa terrestre ou continental. Uma linha de nuvens convectivas poderá frequentemente formar-se ao longo da frente de brisa, imediatamente fora da linha da costa. Ventos locais à superfície são geralmente perpendiculares à linha de nuvens. Esse fenómeno pode ser observado em muitas regiões durante as primeiras horas da manhã, e pode provocar chuva fraca nessa região [35]. Na Figura 3.4 está representada a circulação da brisa marítima/terrestre, respetivamente.



a)



b)

Figura 3.4 – Desenvolvimento da brisa a) marítima e b) terrestre. Fonte [35].

A circulação da brisa marítima/terrestre estende-se em geral a poucas dezenas de quilómetros da costa em qualquer das direções. No entanto, a persistência desta circulação pode determinar fortemente o clima em determinadas regiões.

3.1.2.2. Brisa de vale e de montanha

Durante o dia, nas regiões montanhosas, a radiação solar aquece as superfícies inclinadas do vale, que por sua vez aquece o ar em contato com ela. O ar aquecido, sendo menos denso que o ar da mesma altitude acima do vale, ascende-se e dá origem a um fenómeno conhecido como brisa do vale. À noite, o fluxo inverte. As encostas da montanha esfriam rapidamente, esfriando o ar em contato com eles. O ar mais frio e mais denso movimenta-se para o vale, desencadeando a brisa da montanha. Este ciclo diário de fluxo de vento é mais visível no verão quando os ventos predominantes são quentes, *i.e.*, menos densos. Na Figura 3.5 pode-se observar a representação da brisa de vale e montanha, com inversão do sentido da circulação entre a situação diurna e noturna. Na literatura a brisa de vale e de montanha são geralmente designadas por ventos anabáticos e catabáticos, respetivamente.

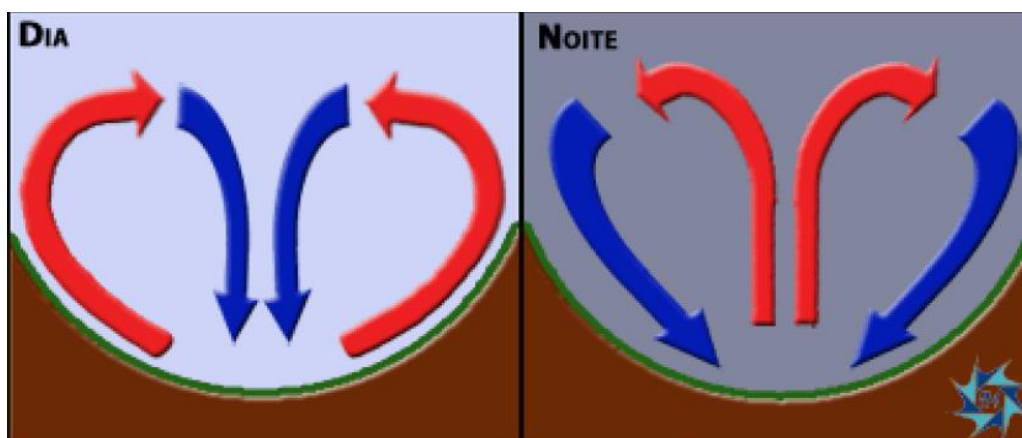


Figura 3.5 – Brisa de vale e de montanha. Fonte [39].

Os efeitos de brisa descritos anteriormente são exemplos de circulações locais do escoamento devido à existência de variações das propriedades da superfície, neste caso, traduzidas pela criação de desequilíbrios térmicos associados ao ciclo diurno.

3.1.3. Camada limite atmosférica

Denomina-se de camada limite atmosférica (CLA) a zona da troposfera que é influenciada diretamente pela superfície do planeta, em contacto direto com a superfície terrestre. O atrito existente entre a superfície terrestre e a massa de ar em movimento tem como efeito um retardar do escoamento. Este efeito é difundido em altura por um processo designado de mistura turbulenta.

Uma vez que a força de atrito exercida pelo solo sobre o escoamento decresce com o aumento da distância do solo, esta torna-se desprezável para alturas suficientemente elevadas nas quais a velocidade do escoamento toma o valor do vento gradiente (abordado no subcapítulo 3.1.1.3 – Vento do gradiente), Figura 3.6. A camada de ar acima da camada limite é denominada de atmosfera livre.

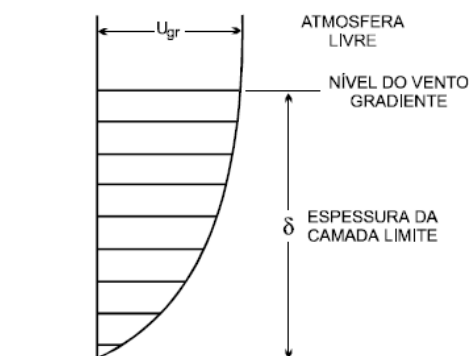


Figura 3.6 – Representação da camada limite atmosférica. Fonte [40] e [41].

De acordo com vários autores, [41] e [42], a espessura da CLA é da ordem de algumas centenas de metros, tipicamente, de 600 a 1000 metros. A variabilidade diurna e a frequência relativamente elevada de turbulência perto do solo são características que distinguem a camada limite do resto da atmosfera. A espessura e a forma da CLA dependem essencialmente do tipo de fronteira, ou seja, da configuração da superfície terrestre. A orografia do terreno, ou, a uma escala de comprimento inferior, a rugosidade do solo, condiciona de modo determinante o perfil da velocidade média que descreve a CLA (Figura 3.7) [41] e [42].

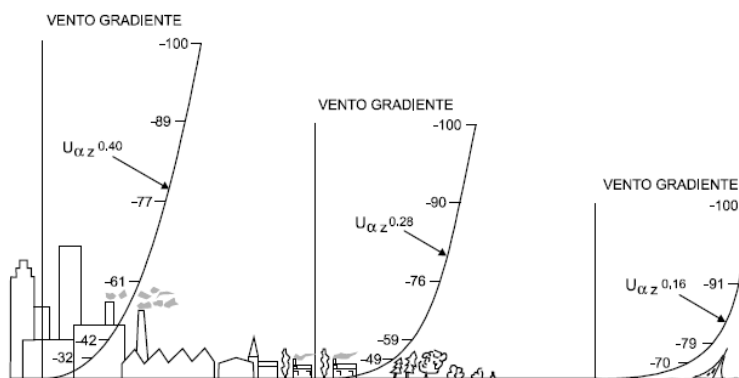


Figura 3.7 – Efeito da rugosidade do solo na CLA [43].

Como representado na Figura 3.8, a CLA pode ser dividida em duas subcamadas, a subcamada logarítmica na qual as tensões de corte são aproximadamente constantes e iguais às tensões de corte do solo, e a subcamada exterior, na qual as tensões de corte evoluem do valor assumido na subcamada logarítmica até se anularem no topo da CLA, ou seja, na atmosfera livre. Na CLA, e na condição de atmosfera neutra, o perfil da velocidade do vento pode ser descrito pela lei logarítmica Prandtl vulgarmente designada por “lei de parede”:

$$\bar{U}_z = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} + b_0 \quad (3.9)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (3.10)$$

onde, \bar{U}_z é a velocidade média do vento à altura z , u_* velocidade de atrito, τ_0 é a tensão de corte superficial, k a constante universal de Von Karman ($k \cong 0,4$), b_0 uma constante de integração e z_0 a variável que define o comprimento da rugosidade. A distância acima do solo até à qual a lei de parede é considerada válida, é dada pela relação:

$$z_l = b' \frac{u_*}{f_c} \quad (3.11)$$

onde b' é uma constante que toma valores entre 0,015 e 0,03 [41] e f_c representa o parâmetro de Coriolis.

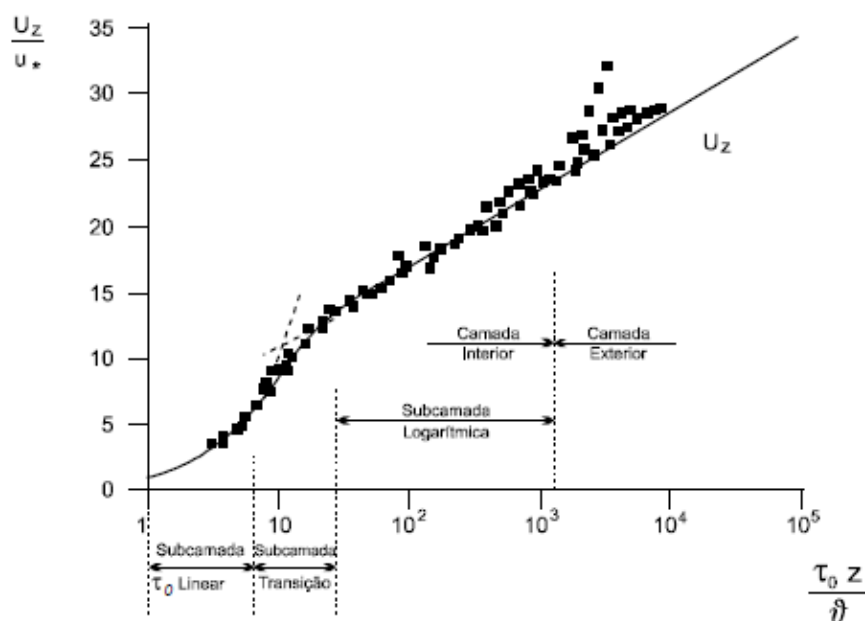


Figura 3.8 – Perfil/estrutura da CLA. Fonte [44].

Relacionado com a subcamada logarítmica pode ainda definir-se o coeficiente de atrito do escoamento no solo, κ , cujos valores são apresentados para vários tipos de rugosidade na Tabela 4 [41]:

$$\kappa = \frac{\tau_0}{\rho \bar{U}_z^2} \quad (3.12)$$

Tabela 4 – Coeficientes de atrito no solo. Fonte [41].

Tipo de terreno	$Z_0(\text{cm})$	$\kappa \times 10^3$
Areia	0.01 a 0.1	1.2 a 1.9
Superfície do mar*	0.0003 a 0.5	0.7 a 3.6
Neve	0.1 a 0.6	1.9 a 3.9
Relva baixa	0.1 a 1.0	1.9 a 3.4
Estepes	1.0 a 4.0	3.4 a 5.2
Descampados	3.0 a 4.0	4.1 a 4.7
Relva alta/Cultura de Cereais	4.0 a 10.0	5.2 a 7.6
Arbustos	10.0 a 30.0	7.6 a 13.0
Terreno arborizado**	90.0 a 100.0	28.0 a 30.0
Subúrbios	20.0 a 40.0	10.5 a 15.4
Centro de povoações	35.0 a 45.0	14.2 a 16.6
Centro de grandes cidades	60.0 a 80.0	20.0 a 50.0

*função da velocidade do vento e da ondulação

**função da altura média das árvores (15m) aproximadamente 10^2 árvores/ha

substituindo as expressões (3.9) e (3.10) na equação (3.11) obtém-se:

$$\kappa = \left(\frac{u_*}{\bar{U}_z} \right)^2 = \frac{k^2}{\ln^2\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (3.13)$$

Recorrendo a uma aproximação empírica é possível determinar igualmente o perfil da velocidade do vento na subcamada logarítmica através de uma lei de potências:

$$\frac{\bar{U}_{z2}}{\bar{U}_{z1}} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad (3.14)$$

onde o expoente α se pode ajustar ao tipo de terreno, tomando normalmente o valor de 1/9 para o terreno aberto, sendo z_1 e \bar{U}_{z1} a altura e velocidade de referência conhecidas, e \bar{U}_{z2} a velocidade extrapolada para a altura z_2 . Contudo, a lei de potências deve somente ser usada como uma primeira aproximação. Na subcamada exterior, o perfil de velocidades afasta-se do descrito pela lei logarítmica. Este afastamento é controlado pelo escoamento exterior na zona de atmosfera livre que transfere energia para a zona de fronteira com o solo através da subcamada logarítmica [41].

3.1.3.1. Parâmetros condicionantes do aproveitamento eólico

A disponibilidade do recurso eólico dentro da CLA está dependente de vários fatores que, condicionam de alguma forma o escoamento atmosférico num determinado local/região, sendo que os seguintes fatores são usualmente considerados os mais relevantes:

- Velocidade e direção do escoamento;
- Obstáculos e rugosidade;
- Orografia local.

a) Velocidade e direção do escoamento

Os valores das medições da velocidade e direção do vento são requisitos essenciais para a caracterização do escoamento atmosférico de um determinado local. As boas práticas do setor eólico recomendam

campanhas experimentais por um período mínimo de um ano, em locais onde se pretendem instalar os parques eólicos, e a uma altura tão próxima quanto possível do rotor da turbina eólica a instalar. Na Figura 3.9 encontra-se apresentada a relação entre a precisão de uma campanha experimental e a duração da mesma.

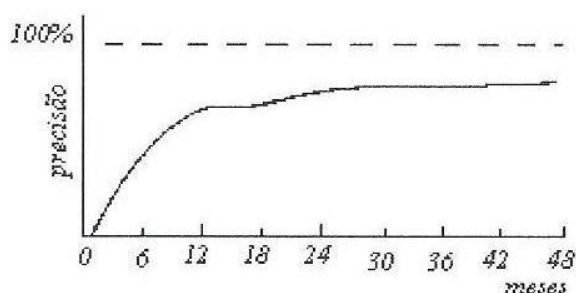


Figura 3.9 – Precisão nas estimativas em função da duração de uma campanha experimental. Fonte [45].

De acordo com a Figura 3.9, a avaliação do recurso eólico para um determinado local, com um nível de precisão adequado, requer a realização de uma campanha experimental durante pelo menos de 12 meses, por forma a refletir a variabilidade sazonal do vento. No entanto, o vento apresenta também uma variabilidade inter-anual significativa, pelo que, é desejável a realização de campanhas experimentais mais longas, para que se possa garantir que o período de tempo escolhido seja considerado climatologicamente típico. Em suma, quanto mais longa for a campanha experimental mais representativa do escoamento de longo termo é a velocidade média, e consequentemente, maior precisão se obtém nas estimativas de produção energética de uma turbina ou parque eólico.

b) Obstáculos e rugosidade

Entende-se por rugosidade do solo, o efeito conjunto da superfície do terreno e dos obstáculos presentes numa determinada região que provocam modificações na propagação do escoamento junto ao solo. Um local ideal é aquele que apresenta uma rugosidade reduzida e homogénea, no entanto, os locais mais frequentes para exploração da energia encontram-se em regiões com vários tipos de rugosidade que se interpenetram, influenciando o escoamento.

Quando se presencia uma grande variedade de superfícies é de esperar que cada uma exerça uma certa influencia no escoamento, sendo esta influencia mais forte ou mais fraca consoante o tipo de rugosidade que caracteriza o terreno do local em estudo. A presença de elementos de rugosidade pode, também, provocar a formação de zonas de recirculação e separação do escoamento.

Um elemento é um obstáculo ou rugosidade de acordo com a sua distância ao ponto de interesse e com as suas características. Assim, um edifício, é considerado obstáculo se *i)* a torre anemométrica ou a turbina eólica estiver a uma distância inferior a 50 vezes a altura do elemento, ou *ii)* a turbina eólica ou a torre anemométrica tiver uma altura próxima de 3 vezes a altura do elemento. Se o ponto de interesse estiver mais afastado do que 50 vezes a altura do elemento ou apresentar uma altura superior a 3 vezes a altura do elemento, este deve ser classificado como rugosidade [46]. Na Figura 3.10 pode-se observar a influência de um obstáculo no escoamento atmosférico.



Figura 3.10 – Influência de um obstáculo no escoamento atmosférico. Fonte [46].

De acordo com a Figura 3.10, escoamento divide-se ao colidir com a superfície do obstáculo. Parte do escoamento não o ultrapassa, formando uma esteira a montante do edifício. O vento que consegue ultrapassar o obstáculo forma também uma esteira a jusante do edifício, ainda mais evidente do que a montante deste. A representação da Figura 3.10 é um exemplo simplificado da influência de um obstáculo, uma vez que existem vários fatores que influenciam o comportamento do vento, tal como a forma e orientação do obstáculo.

c) Orografia local

Dada a elevada dependência do escoamento de um determinado local da complexidade do terreno (*e.g.*, terreno plano, elevações de declive suave ou terreno montanhoso), a orografia constitui um dos elementos mais importantes na caracterização do escoamento atmosférico de um determinado local.

Através da observação da Figura 3.11 é possível constatar a perturbação verificada no escoamento atmosférico devido a presença da montanha, nomeadamente, a formação duma zona de turbulência depois do vento atravessar o seu cume [47].



Figura 3.11 – Influência da orografia na circulação do vento. Fonte [47].

Assim, um fator importante na escolha dos locais adequados à instalação de um parque eólico é a configuração da orografia, uma vez que esta condiciona o escoamento atmosférico desencadeando um aumento/diminuição da velocidade do vento. Na

Figura 3.12 pode-se observar as configurações da orografia por ordem de preferência para instalar um parque eólico.

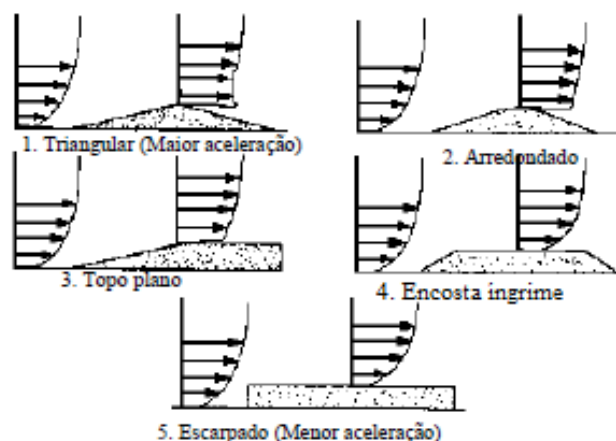


Figura 3.12 – Formas dos montes por ordem de preferência. Fonte [48].

De igual forma, as orientações das linhas de cumeadas em relação à direção do vento podem representar um elemento decisivo na seleção dos locais mais adequados para aproveitamento do recurso eólico. Na Figura 3.13 encontra-se representada a orientação ideal das linhas de cumeadas em relação à direção do vento. A aceleração máxima no cume de uma montanha ocorre quando o vento predominante sopra na direção perpendicular à linha do cume. A instalação de um parque eólico numa linha de cumeadas apresenta algumas vantagens, pois esta atua como uma “torre”, elevando os aerogeradores a altitudes onde o vento é mais intenso. Adicionalmente, num terreno com estas características, é necessário contabilizar vários efeitos, inclusive, a componente térmica cuja relevância não deverá ser descurada na medida em que pode promover a formação de ventos de vale e de montanha.

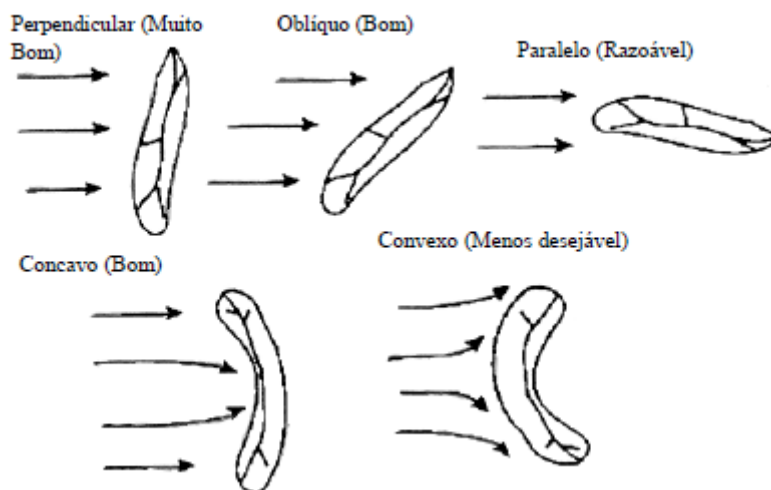


Figura 3.13 – Orientação ideal da linha de cumeadas em relação à direção do vento. Fonte [48].

3.1.4. Energia do Vento

Nas campanhas experimentais da avaliação do recurso eólico, é habitual registar valores médios de velocidade do vento de dez em dez minutos, frequência de aquisição que se situa no vazio espectral [29]. Desta forma a velocidade média do vento é definida através de [49]:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(T) dt \quad (3.15)$$

onde u representa o valor médio da velocidade e T o intervalo de tempo considerado. O fluxo de potência do vento (W/m^2) disponível num intervalo de tempo T é dado pela equação:

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^3 \quad (3.16)$$

onde ρ representa a densidade do ar.

No setor eólico, é usual recorrer a distribuição de Weibull para descrever as características do escoamento num determinado local. Esta distribuição é baseada em dois parâmetros, A e k , e representam o parâmetro de escala (m/s) e o parâmetro de forma (adimensional) da distribuição de Weibull, respetivamente.

Matematicamente, a distribuição de Weibull exprime-se através da seguinte expressão:

$$f(\bar{u}) = \frac{k}{A} \left(\frac{\bar{u}}{A} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{\bar{u}}{A} \right)^k \right) \quad (3.17)$$

onde $f(\bar{u})$ representa a frequência de ocorrência da velocidade média e \bar{u} representa a velocidade média do módulo da velocidade do vento.

O valor médio da velocidade v (m/s), pode ser dado por

$$v = A \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \quad (3.18)$$

sendo a função gama (Γ) definida por:

$$\Gamma = \int_0^\infty \exp(-t) t^{x-1} dt, \text{ com } x > 0 \quad (3.19)$$

O fluxo de potência E (W/m^2) pode ser facilmente calculado pela relação:

$$E = \frac{1}{2} \rho A^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \quad (3.20)$$

Uma das formas para calcular os parâmetros da distribuição de Weibull é através do conhecimento do valor médio e do desvio padrão da série de registos. Desta forma, estes parâmetros podem determinar-se, aplicando métodos iterativos, através das seguintes equações [49]:

$$\frac{\bar{u}}{A} = \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \text{ e } \frac{\sigma}{\bar{u}} = \left[\frac{\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right)}{\Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right)} - 1 \right]^{1/2} \quad (3.21)$$

onde o desvio padrão (σ) é dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2} \quad (3.22)$$

Com u_i a velocidade do vento no instante i , n – o número total de dados e o i – o número de registos.

O cálculo da estimativa anual de produção de energia E (MWh/ano) para um dado local é feito através da integração do produto da função de distribuição de classes de vento $f(u)$, pela curva de potência de uma turbina eólica, $P_{WT}(\bar{u})$ [50]. Neste caso, obtém-se:

$$E = 8760 \times \int_0^{\infty} f(\bar{u}) P_{WT}(\bar{u}) d\bar{u} \quad (3.23)$$

onde 8760 representa o número de horas do ano. No caso da função distribuição de Weibull, a estimativa anual de produção de energia E é dada pela seguinte expressão [49]:

$$E = 8760 \times \int_0^{\infty} \frac{k}{A} \left(\frac{\bar{u}}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{\bar{u}}{A}\right)^k\right) P_{WT}(\bar{u}) d\bar{u} \quad (3.24)$$

Assim, calculando o quociente entre a equação (3.24) e a potência nominal da(s) turbina(s), é possível determinar o indicador NEPs, expresso em h/ano, que representa o número de horas anuais equivalentes à potência nominal. O valor deste indicador é usualmente utilizado no setor eólico, uma vez que este permite avaliar a sua rentabilidade. De uma forma geral, um parque eólico é economicamente viável se o respetivo indicador NEPs for superior a 2000 h/ano [29].

3.1.5. Clima característico de Cabo Verde

Geograficamente o Arquipélago de Cabo Verde fica localizado numa vasta região de clima árido e semiárido do continente africano, que corresponde a uma zona de transição entre o deserto do Sahara e as savanas do Sudão. Por esta razão, à semelhança de todos os países do Sahel⁶, o clima do Arquipélago de Cabo Verde é caracterizado por uma longa estação seca, interrompida por um curto período húmido, em que as chuvas se concentram apenas em alguns dias do ano. Deste modo, o clima do arquipélago é classificado de tropical seco, sendo considerados a existência de duas estações distintas durante o ano [51]:

- ❖ A estação seca ou das brisas – período de dezembro a junho;
- ❖ A estação húmida ou das águas – período de agosto a outubro.

Os meses de julho e novembro são considerados de transição.

Devido à sua envolvimento num ambiente oceânico, Cabo Verde regista temperaturas médias anuais moderadas, cerca de 25 °C, e a humidade relativa do ar oscila entre os 60 – 85%. Os valores da precipitação média rondam os 200 – 250 mm/ano, sendo a sua distribuição espacial e temporal influenciada fundamentalmente pela oscilação da frente intertropical (FIT). Com efeito, a precipitação normalmente resume-se a chuvas curtas e muito intensas que, quando combinada com a topografia do relevo, podem provocar a ocorrência de um regime torrencial de erosão fluvial. Por esta razão, é muito frequente nas ilhas montanhosas, a existência de vales encaixados e a acumulação de depósitos aluviais, nas regiões mais baixas, transportadas pelo fluxo de drenagem, enquanto nas ilhas planas os canais de drenagem apresentam um padrão baixo e dispostos em forma de meandros intercalados [51].

O clima do arquipélago é condicionado por três circulações atmosféricas, de origem e características distintas, proporcionando a existência de microclimas com uma distribuição espacial e temporal mais ou menos definida:

⁶ Uma vasta área do continente africano, que abrange vários países da África ocidental, caracterizada por um complexo climático.

- ❖ Proveniente do deserto do Sahara o arquipélago é afetado pelo Harmatão, um tipo de vento que atinge as ilhas ainda quente e seco, apesar do percurso marítimo de centenas de quilómetros. Este vento normalmente transporta uma grande quantidade de poeiras, aumentando a aridez do clima, com prejuízo na prática da agricultura [52].
- ❖ Os ventos Alísios de Nordeste são ventos dominantes que sopram durante quase todo o ano e que, devido ao seu teor de humidade, trazem uma certa frescura ao arquipélago. Devido à influência do clima quente da região, esta corrente de ar poderá dar origem a períodos de precipitação, beneficiando sobretudo as zonas de maior altitude, mesmo durante a estação seca [53].
- ❖ Para além do Harmatão e dos Alísios do Nordeste, o arquipélago também é afetado pela Monção do Atlântico Sul, que é uma corrente de ar quente e húmida, com origem na região equatorial. Os ventos da Monção normalmente atingem o arquipélago durante o verão, entrando em contacto com os ventos Alísios e com o vento Harmatão, para formar a FIT. Este vento, devido às suas características, torna-se no principal responsável pela queda de precipitação durante a estação húmida, no verão [53].

Assim, o clima do Arquipélago de Cabo Verde apresenta algumas semelhanças aos climas desérticos quentes. Porém, possui diferenças notórias por ter maior humidade do ar, precipitações periódicas e amplitudes térmicas baixas, tendo, como já foi referido, o ambiente oceânico e os ventos Alísios um papel fundamental na modulação da temperatura ambiente [53].

Outro facto que influencia fortemente o clima local é o tipo de relevo insular (geomorfologia). Com efeito, é possível diferenciar vários andares climáticos, sendo que o clima árido e semiárido se localiza, sobretudo, junto do litoral, evoluindo para clima subhúmido a húmido nas regiões mais montanhosas [52].

3.2. Modelo numérico – MM5

Os modelos numéricos de mesoescala, que resolvem as equações diferenciais que traduzem as leis físicas descrevendo o comportamento hidrodinâmico da atmosfera, permitem obter os parâmetros meteorológicos mais relevantes para a realização de um Atlas (*e.g.* intensidade e direção do vento [54]).

O modelo numérico MM5 é um modelo atmosférico de mesoescala de acesso livre, sendo continuamente aperfeiçoado através da contribuição de diversos utilizadores das universidades e institutos de investigação em todo o mundo. Embora o MM5 tenha sido originalmente desenvolvido para previsão meteorológica de curto prazo, este passou por muitas mudanças ao longo dos anos, como a atualização de condições de limite inferiores (temperatura da superfície e gelo no mar) e inclusão de processos de superfície terrestre, tornando-se adequado para simulação climática a longo prazo. O aspeto mais importante do MM5 é o modelo de configuração da grelha, a horizontal compreende interseções de latitude e longitude e a vertical abrange os níveis sigma.

Para a obtenção de um Atlas do potencial eólico, estes modelos são usualmente alimentados por dados meteorológicos (usualmente designados por condições iniciais/fronteiras) obtidos através de projetos de reanálises. Em geral, os dados meteorológicos estão disponíveis em níveis de pressão normais, e são transformados no modelo para níveis sigma para permitir o seguimento do terreno e níveis híbrido-isentrópicos (níveis sigma na superfície e níveis isentrópicos em níveis mais elevados) [55]. Este modelo utiliza coordenadas verticais sigma (σ) que acompanham o terreno, tornando-o capaz de simular circulações de mesoescala ou escala regional. As coordenadas verticais sigma são calculadas utilizando a pressão atmosférica e a pressão de topo dos dados de pressão do modelo [20]. Dentro do modelo

numérico MM5 o campo terrestre e os dados meteorológicos isobáricos (pressão constante) são interpolados numa grelha latitude-longitude. No modelo, os dados meteorológicos de entrada são transformados da fonte motriz (projetos de reanálises) para resoluções espaciais e temporais mais detalhadas por meio de domínios. Existem dois tipos de domínios, domínios-mãe e subdomínios que, como o nome indica, são domínios que dependem e encontram-se dentro dos domínios-mãe. Os dados de entrada das reanálises são apenas forçados no domínio-mãe. A interação entre domínios pode ser *i*) unidirecional, o que significa que a transferência de dados ocorre num único sentido, dos domínios-mãe para os subdomínios ou *ii*) bidirecional onde a transferência de dados ocorre nos dois sentidos.

O MM5 é composto por um conjunto de módulos independentes de pré e pós-processamento [56], Figura 3.14. O conjunto de informação processada por cada módulo constitui a base de dados para as simulações do programa principal, que fornece os prognósticos dos campos das grandezas meteorológicas.

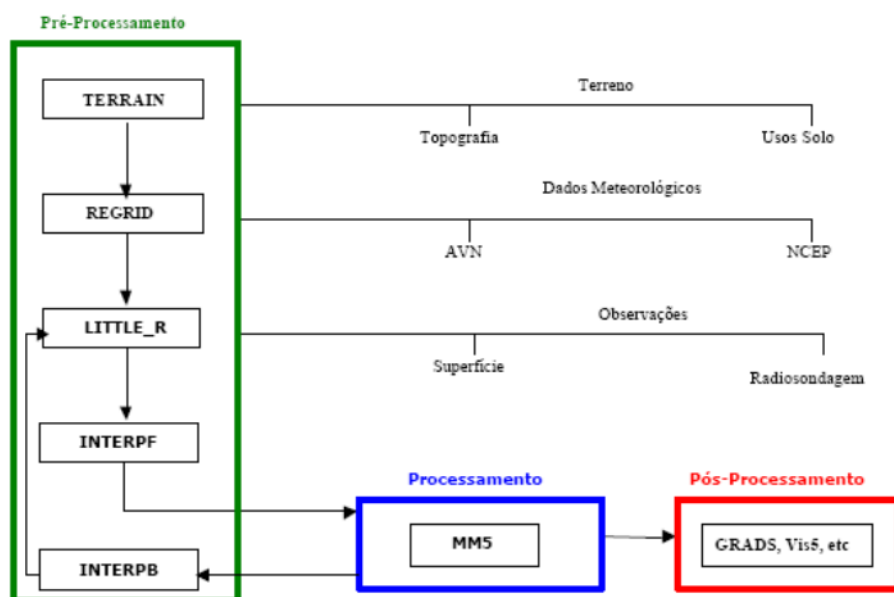


Figura 3.14 – Módulos de pré e pós processamento do modelo numérico MM5. Fonte [56].

TERRAIN: neste módulo é feita a configuração dos domínios espaciais, a relação entre eles e a criação do campo terrestre (topografia, vegetação, etc.). Este módulo faz a interpolação horizontal da elevação do terreno e dos dados da vegetação para cada domínio de simulação. Os dados do campo terrestre gerado neste módulo são depois usados pelo *REGRID*, e mais tarde pelo *MM5*. Este módulo também determina campos de valores constantes necessários para a modelação como: latitude e longitude, fator de escala do mapa e parâmetros de *Coriolis*. Ainda neste módulo são gerados campos adicionais opcionais, como o tipo de solo, frações de vegetação e temperatura média anual do solo [56].

REGRID: executa a interpolação horizontal dos dados meteorológicos provenientes de projetos de reanálises para as grelhas do terreno definido no módulo *TERRAIN*. Essa interpolação é feita para todos os pontos da grelha definidos para o domínio-mãe. Neste módulo é analisado os níveis de pressão e de superfície onde é feita a interpolação bidimensional. O *REGRID* lê os dados meteorológicos de entrada em grelha, os valores de entrada proveniente do módulo *TERRAIN* e cria informações de saída contidos em pastas que posteriormente são usados pelos módulos *LITTLE_R* ou *INTERPF* [56].

LITTLE_R: neste módulo é efetuado o melhoramento dos campos meteorológicos iniciais, inserindo observações, como por exemplo, dados de radiossondagens ou estações meteorológicas [56]. Este módulo não foi aplicado neste trabalho.

INTERPF: permite a manipulação, incluindo a interpolação vertical dos dados iniciais para as coordenadas do modelo (coordenadas de pressão para coordenadas sigma), dos dados necessários para a transferência de informações dos módulos REGRID e LITTLE_R para o modelo numérico de mesoescala MM5. Este módulo gera três diferentes tipos de ficheiros: *MMINPUT DOMAINn* - contém os campos 2D e 3D, *e.g.*, campo de vento, temperatura e pressão, *BDYOUT DOMAINn* - contém informação das condições fronteira laterais dos campos 3D) e *LOWBDY DOMAINn* - contém as condições fronteira de superfície, nomeadamente, a variabilidade temporal do campo da temperatura do ar à superfície e à superfície do mar e campos opcionais como a cobertura do gelo no oceano e de neve [56].

MM5: é neste programa que é feita a simulação numérica do tempo, resolvendo as equações de Navier-Stokes em três dimensões, a equação termodinâmica e a equação de conservação da massa no sistema de coordenadas sigma recorrendo à parametrizações [19]. As opções físicas dentro de cada parametrização encontram-se na Tabela 5 numeradas de acordo com identificação do modelo MM5. Neste módulo são usados dois ficheiros para especificar os parâmetros do modelo: *CONFIGURE.USER* – que suporta os modelos físicos e os detalhes das parametrizações escolhidas e *MM5.DECK* que possui a configuração do modelo e as informações da execução do modelo, como por exemplo, o intervalo de integração do modelo, resolução temporal das simulações [56].

Tabela 5 – Lista das opções físicas e as opções de parametrizações⁷, numeradas de acordo com a numeração identificada pelo MM5.

Parametrizações físicas	Humidade específica (IMPHYS)	Cúmulos (ICUPA)	Camada Limite Planetária (IBLTYP)	Radiação (IFRAD)
Opções	1-Dry	1-none	1-none	1-none
	2-Stable Precipitation	2-Anthes-Kuo	2-bulk PBL	2-simple cooling
	3-Warm rain	3-Grell	3-Blackadar	3-cloud
	4-Simple ice	4-Arakawa-Schubert	4-Burk-Thompson	4-CCM2
	5-Mixed-phase	5-Fritsch-Chappell	5-Eta	5-RRTM
	6-Goddard	6-Kain-Fritsch	6-MRF	-
	-	7-Betts-Miller	7-Gayo-Seaman	-
	-	8-Kain-Fritsch 2	8-Pleim-Chang	-

Este módulo gera o ficheiro *MMOUT-DOMAINn* que contém os resultados das simulações.

NESTDOWN: faz a interpolação dos resultados obtidos através do MM5 para uma malha espacial mais fina [56].

⁷ Para além das opções físicas e de parametrizações apresentadas na tabela 3.2, O MM5 possui mais duas opções físicas, o ISOIL e o IPOLAR. O ISOIL tem como opções de parametrização: 0 - No; 1 - Yes (funciona só com IBLTYP=2, 4, 5, 6); 2 - Noah land-surface scheme (funciona só com IBLTYP= 4, 5); 3 - Pleim-Xiu LSM (só funciona com IBLTYP=7). O IPOLAR tem como opções de parametrizações: 0 – None; 1 - Simple Cooling; 2 - CCM2; 3 – RRTM.

INTERPB: interpola os dados do modelo de níveis sigma para níveis de pressão[56]. Este módulo não foi aplicado neste trabalho.

MM5toGrADS: é um pósprocessador gráfico que pode ser usado para converter os dados de saída do modelo *MM5* permitindo a visualização dos resultados. Este módulo é usado para visualizar a representação gráfica das variáveis contidas no ficheiro *MMOUT-DOMAINn* (*output MM5*) [56].

Uma vez que a manipulação (*e.g.*, tratamento e análise) de dados no ArcGIS constitui um passo essencial no desenvolvimento da metodologia apresentada na presente dissertação, no tópico seguinte, são abordados os aspetos gerais do *software* ArcGIS que são considerados importantes para o desenvolvimento do Atlas do Vento e identificação do Potencial Sustentável para o arquipélago de Cabo Verde.

3.3. SIG – Aspetos gerais

A metodologia do desenvolvimento do Atlas do potencial eólico presente nesta dissertação baseia-se na utilização de ferramentas SIG, mais concretamente através da utilização do *software* ArcGIS. A dependência geográfica do recurso eólico e a necessidade de uma correta avaliação do potencial eólico de uma determinada região ou de um dado local, bem como a determinação do potencial eólico sustentável estão na base da decisão do uso de ferramentas SIG para o desenvolvimento deste trabalho.

Uma ferramenta SIG é o alvo de várias definições e pode ser definida como um conjunto de metodologias que envolvem o levantamento, armazenamento, processamento e representação de dados georreferenciados [57]. Representar, analisar e conhecer a dimensão espacial associada a um fenómeno são os principais desafios do SIG. Um Sistema de Informações Geográficas permite visualizar, consultar, analisar e interpretar de forma a entender padrões e relações entre dados e exibir resultados como mapas, tabelas e gráficos. O SIG ajuda organizações de diferentes tamanhos e em todos os setores de atividade, por isso há um interesse e uma conscientização crescente sobre o valor estratégico e económico dos SIG.[58]. Deste modo, os SIG são amplamente utilizados para: redução de custos a partir de maior eficiência; melhores tomadas de decisão; melhor comunicação; maior manutenção de registo; gerir geograficamente acontecimentos e fenómenos, etc. [59]. Os SIG permitem produzir mapas de forma rápida, facilitam a utilização, a revisão e atualização dos mapas e permitem revolucionar a análise quantitativa dos dados espaciais. Um SIG pode ser utilizado para diversas aplicações como na agricultura, na arqueologia, geologia, aplicações municipais, etc. [58] Na Figura 3.15 encontra-se apresentada a esquematização de um SIG de acordo com [58].

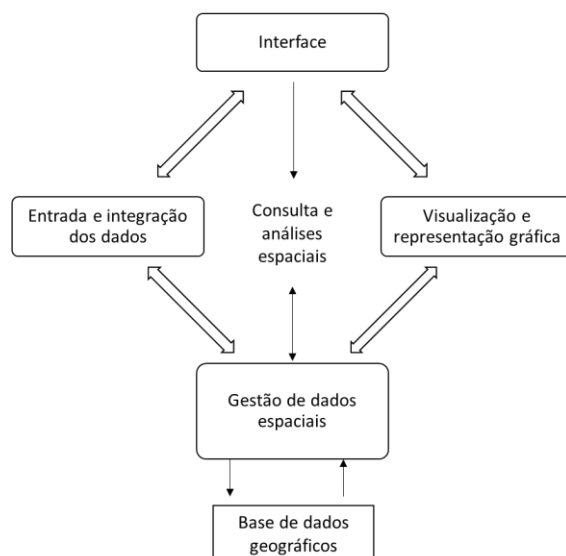


Figura 3.15: Esquematização de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) [58].

Nesta secção apresenta-se uma descrição sucinta dos processos utilizados para manipular as informações dentro de uma ferramenta SIG.

3.3.1. Modelos de dados

Antes de qualquer operação num *software* SIG, é necessário conhecer quais os modelos de dados suportados pelos SIG. Os modelos de dados são um conjunto de regras usadas para converter a variação geográfica do mundo real num conjunto discreto de objetos [58]. Podem ser de dois tipos: *raster* e *vetorial*.

No modelo matricial (*raster*), o espaço é dividido numa grelha regular de *pixels* (células), onde a localização de um determinado atributo é feita através de linhas e colunas das células por ela ocupadas. A grelha de células preenche toda área em estudo, onde cada célula contém apenas um valor que representa a condição ou atributo desse ponto. Este modelo relata os acontecimentos em todo o local em estudo, podendo o valor atribuído a cada célula representar um código de atributo qualitativo ou quantitativo [58]. O modelo *raster* é mais indicado para a exibição de informações contínuas numa determinada área, informações estas que não podem ser divididas em componentes vetoriais (pontos, linhas e polígonos) [59].

Contrariamente ao modelo matricial, o modelo vetorial relata os acontecimentos onde ocorre determinado objeto espacial. Todas as identidades presentes neste modelo são representadas através de pontos, linhas e polígonos que se encontram georreferenciados num sistema de coordenadas. O modelo vetorial não preenche todo o espaço e as entidades espaciais correspondem às entidades tal e qual elas existem no mundo real [59]. Os atributos dos objetos são armazenados numa base de dados alfanumérica, onde a ligação entre o ficheiro de desenho e a tabela de atributos pode ser feita associando um identificador único a cada elemento do mapa [58].

3.3.2. Dados de entrada

Antes de serem usados num sistema SIG, os dados geográficos necessitam passar por alguns processos, de forma a torná-los convenientes para o sistema. Desta forma os dados são compilados, passando por processos de digitalização, nomeadamente, digitalização automática efetuada por sistemas automáticos de varrimento (denominado de *scanning*) atribuição de valores (atributos), codificação de elementos recolhidos em trabalho de campo (como são os tipos de vegetação e outros elementos de ocupação do solo como localidades ou aglomerados habitacionais de pequena dimensão). Os dados de entrada necessitam de ser georreferenciados, ou seja, a referência espacial de conjuntos de dados num sistema de coordenadas pré-selecionado e a transformação entre sistemas de coordenadas sempre que necessário [60].

A reestruturação dos dados é uma forma de reformatação dos dados de entrada de forma a serem suportados pelo sistema, ou para permitir a conversão entre modelos de dados (*raster* e vetorial). Muitas vezes é necessário editar os dados de entrada de forma a identificar e resolver inconsistências não espaciais, espaciais ou topográficas, erros esses frequentes no processo de digitalização [58].

A título de exemplo, neste estudo, numa primeira fase os dados de entrada são os componentes u e v do vento que permite a apresentação dos campos médios da velocidade e direção do vento para o arquipélago de Cabo Verde. Posteriormente, numa segunda fase fez-se a introdução do número de horas equivalentes à potência nominal (NEPs), obtidos através de dois tipos de turbinas eólicas (Vestas V52 de 850 kW e Vestas V80 de 2000 kW). Também fez-se a introdução de informações referenciadas como é a rede viária, zonas protegidas e áreas ocupadas pelos parques eólicos existentes no país.

3.3.3. Tratamento de dados

Os dados podem ser tratados através da seleção, transformação, derivação da informação espacial e operações que permitem a extração e visualizações de resultados [58][57]:

- ❖ Seleção – através de operações baseadas na lógica booleana tendo em conta um conjunto de critérios sobre mapas ou tabelas de registos;

- ❖ Transformação – Consiste na modificação de atributos de um objeto ou elemento e subdivide-se em: Operações aritméticas – Aplicação de uma operação elementar ou função trigonométrica, logarítmica ou exponencial para modificar um atributo; Operações para definir categorias – Modificam os valores dos atributos reclassificando-os em novas categorias. Destacam-se as operações de classificação (conversão de atributos quantitativos em discretos ou nominais) e reclassificação (conversão de atributos nominais noutros atributos do mesmo tipo ou do tipo numérico expressando pesos); Operações geométricas – modificam as características espaciais dos objetos e podem ser de três tipos: transformações geométricas (representação da superfície por meio de um plano); transformações lineares (alteração de escala, rotação ou translação); transformações não lineares (definidas pelo utilizador).
- ❖ Derivação da informação espacial – permite, através de inferência sobre os dados, obter novas informações [58]; Operações de generalização – simplificação dos objetos através da criação de subclasses, capturando apenas as características espaciais mais salientes; *Buffers* – geração de faixas de interesse em torno de entidades geográficas. Podem ser quadrados ou curvos incluindo pontos ou linhas; Operações de sobreposição (*overlay*) – criam novos objetos por aplicação de várias operações da lógica booleana, da aritmética e da estatística sobre dois mapas temáticos, onde cada mapa temático é tratado como uma variável. Operações de derivação sobre uma superfície curva – incluem funções de interpolação e de filtro, para determinar, por exemplo, declives e orientação de vertentes, ou identificar regiões de visibilidade [58].
- ❖ Saída de resultados – operações que possibilitam a extração de informações num sistema SIG para a visualização e análise e podem ser [58]: Operações de desenho gráfico – permitem construir símbolos, uso de cores, padrões e anotações; Operações de visualização dos gráficos; Operações de reestruturação – permitem exportar dados para outros sistemas.

Dada a importância das ferramentas SIG no planeamento do aproveitamento da energia eólica, através da apresentação de informações em forma de mapas, é de destacar as principais funcionalidades deste software na manipulação e geração de mapas. Desta forma pode-se identificar o seguinte [58] [59]:

- ❖ As ferramentas de criação de mapas permitem aos utilizadores criar de uma forma simples os seus próprios mapas através dos seus próprios dados;
- ❖ Os controladores de camadas de bases de dados geográficos permitem a personalização da visualização dos *layers* e da ordem de apresentação dos mapas na mesma janela;
- ❖ Existem vários comandos que permitem efetuar operações entre diferentes tipos de informações e posteriormente permitir a sua visualização através de mapas que pode ser extraído em diferentes formatos de imagens, etc.

Face ao exposto, o recurso a um sistema de informação geográfica revelou-se uma opção valiosa para realização deste trabalho, o qual se prende maioritariamente com o tratamento de informação georreferenciada.

4. Metodologia para identificação do potencial eólico sustentável

A metodologia apresentada na presente dissertação para identificação do potencial eólico sustentável baseia-se em dois passos principais: 1) simulações numéricas de elevada resolução espacial (1x1 km) efetuadas para o arquipélago de Cabo Verde, recorrendo ao modelo de mesoescala MM5 para se obter uma representação estatística suficientemente representativa das principais grandezas meteorológicas, e 2) identificação dos condicionantes mais relevantes no aproveitamento eólico, ou seja, restrições ambientais (áreas protegidas), a rede viária, o declive do terreno, o uso e ocupação do solo, etc. A segunda fase, é realizada recorrendo ao *software* ArcGIS onde são feitas as interações entre o mapa do recurso eólico e os mapas de restrições/critérios. Desta forma, o resultado das operações e interações entre os mapas no ArcGIS permite identificar o potencial eólico disponível para exploração nas diferentes zonas administrativas do arquipélago de Cabo Verde (Figura 4.1).

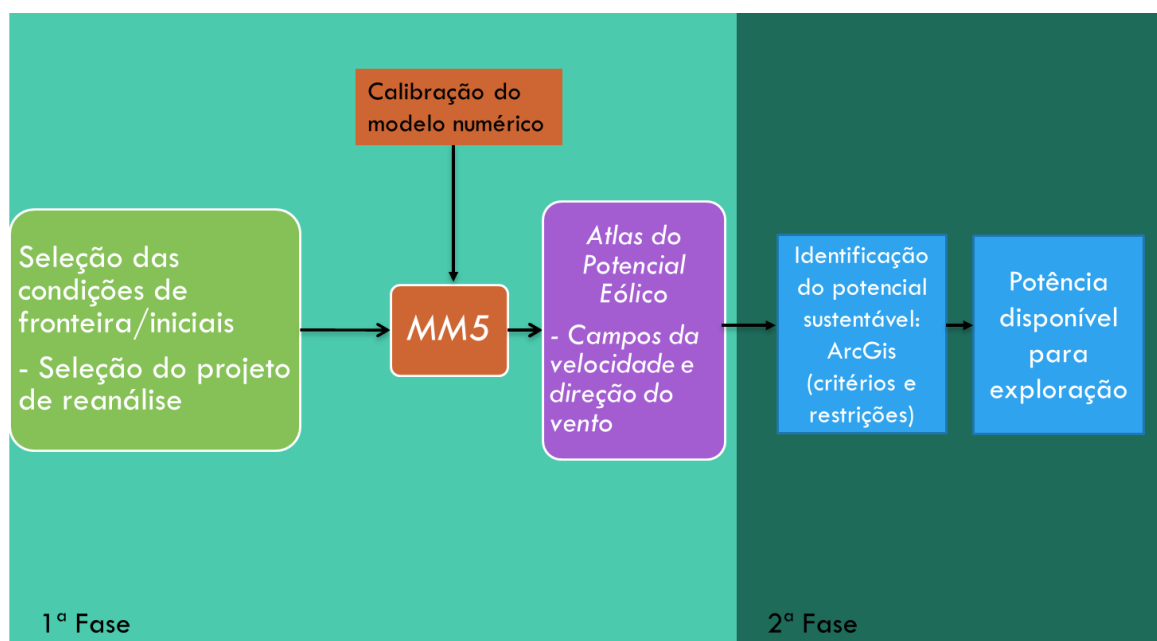


Figura 4.1 – Esquema representativo dos principais passos da metodologia aplicada para identificar o potencial eólico sustentável nas diferentes zonas administrativas do arquipélago de Cabo Verde.

4.1. Metodologia do desenvolvimento do Atlas do Potencial Eólico

Neste tópico são apresentados os passos necessários para a construção do Atlas do Potencial Eólico para o arquipélago de Cabo Verde.

4.1.1. Seleção das condições de fronteira/iniciais do modelo

O primeiro passo para a construção do Atlas do Vento consiste na identificação dos dados do projeto de reanálise (dados históricos obtidos através de um modelo numérico) mais adequados para alimentarem o modelo atmosférico de mesoescala. O critério da escolha do projeto de reanálise baseia-se no estudo comparativo desses dados com os dados das estações meteorológicas, disponíveis publicamente na área em estudo (dados de estações meteorológicas de aeroportos), recorrendo aos seguintes parâmetros estatísticos: correlação, Viés e o erro quadrático médio - *Root Mean Squared Error* - *RMSE*. O *RMSE* é dado pela seguinte expressão:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (4.1)$$

A correlação é dada por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2) \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (4.2)$$

O Viés é expresso da seguinte forma:

$$Viés = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - O_i)}{N} \quad (4.3)$$

Onde N é o número total de registos coincidentes, F_i e O_i representam o valor de um determinado parâmetro meteorológico da reanálise e da estação meteorológica, respetivamente, no instante i , e \bar{F} e \bar{O} representam o valor médio de um determinado parâmetro meteorológico na reanálise e na estação meteorológica, respetivamente. A performance perfeita corresponde a valores de *RMSE* e o Viés igual a zero. No que diz respeito a correlação, o melhor projeto é aquele que apresenta o valor da correlação mais próximo da unidade.

Com base na literatura identificaram-se os quatro projetos de reanálises, disponibilizados gratuitamente, e que têm permitido uma caracterização adequada do recurso eólico em diferentes regiões do globo, Tabela 6.

Tabela 6 – Características dos projetos reanálises em estudo [61] e [62].

Base de dados	Resolução temporal	Resolução horizontal	Níveis verticais	Cobertura temporal	Sistema de simulação
CFSv2 [63]	6 horas	0,50° lat/lon	64	1979-Hoje	3-D
Era-Interim [25]	6 horas	0,75° lat/lon	60	1979-Hoje	4-D
MERRA2 [64]	1 hora	0,50° lat / 0,67°lon	72	1979-Hoje	3-D
GFS [65]	6 horas	0,25° lat/lon	64	2015-Hoje	3-D

Dos quatro projetos apresentados na Tabela 6, importa mencionar que a base de dados GFS corresponde a uma análise⁸. Os projetos reanálises são produzidos através de uma única ferramenta (modelação) e fornecem registos atmosféricos espacialmente completos e coerentes do globo. No caso das análises, estas utilizam inúmeras observações numa grelha irregular para representar o estado da atmosfera. As técnicas computacionais utilizadas nas análises são complexas e incluem *i)* aproximações estatísticas (por exemplo de matrizes de covariância) tanto da variabilidade dos registos como da própria atmosfera, e *ii)* modelos matemático-físicos do comportamento atmosférico (equações geostrófica e hidrostática) [66].

As estações meteorológicas utilizadas neste estudo para identificação das condições de fronteira/iniciais do modelo mais adequadas encontram-se distribuídas por três ilhas, Figura 4.1.

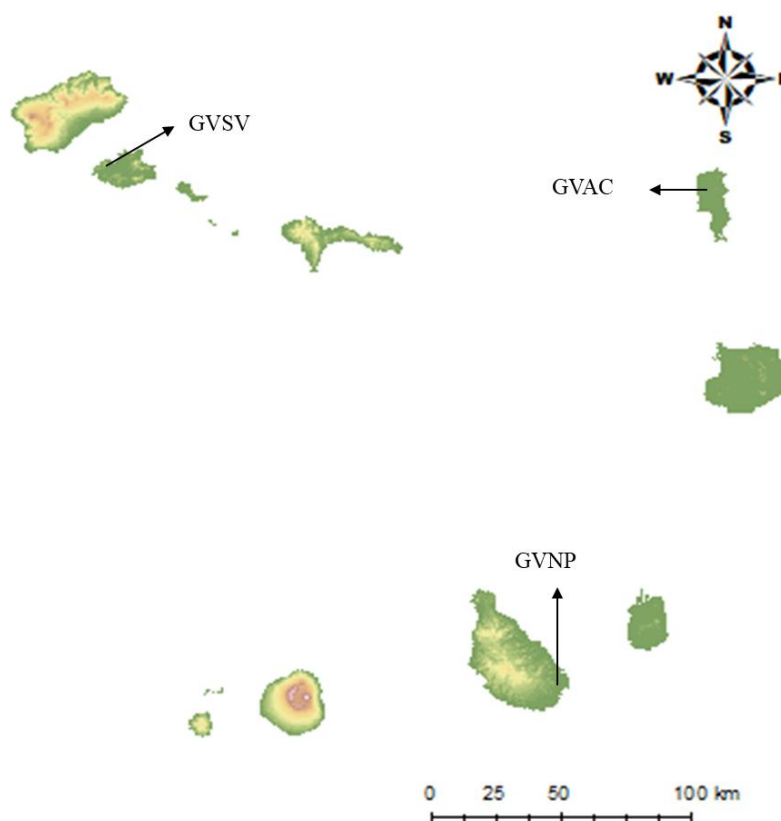


Figura 4.1 – Mapa de Cabo Verde com as localizações das três estações meteorológicas utilizadas nos estudos efetuados.

Estas estações são propriedade do Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica de Cabo Verde, e encontram-se publicamente disponíveis em [67]. Importa referir que existem outras estações meteorológicas na área de estudo, como são exemplos as estações com a identificação de 8589, 8594 e 8593 (com registos de dados num intervalo de 3 horas ou 6 horas), sendo que estas estações se localizam no mesmo sítio das estações com as identificações de GVNP, GVAC e GSVV, respetivamente. Uma vez que as estações meteorológicas GVNP, GVAC e GSVV possuem mais registos de dados (dados

⁸ De forma a simplificar a nomenclatura, nesta tese optou-se por designar todas as bases de dados por reanálises.

medidos com resolução horária), é mais fiável o uso destas estações meteorológicas para comparação com os *outputs* do modelo numérico MM5.

Na Tabela 7 apresentam-se as localizações exatas das estações meteorológicas, que se localizam: no aeroporto da ilha de Santiago (aeroporto Nelson Mandela) com o nome de GVNP, no aeroporto internacional da ilha do Sal (aeroporto Amílcar Cabral) com a designação de GVAC e no aeroporto internacional Cesária Évora localizado na ilha de São Vicente com a designação de GVSV.

Tabela 7 – Localização das estações meteorológicas em Cabo Verde.

Nome da estação	Altitude da estação [m]	Altura dos sensores [m]	Localização da estação	
			Latitude (Norte)	Longitude (Oeste)
GVAC (ilha do Sal)	54	10	16° 44'30,84"	22° 56'56,04"
GVNP (ilha de Santiago)	70	10	14° 55'28,20"	23° 29'36,60"
GVSV (ilha de São Vicente)	20	10	16° 49'59,52"	25° 03'19,08"

As variáveis estudadas para a escolha do projeto reanálise são a velocidade do vento e a pressão atmosférica reduzida ao nível médio do mar (MSLP). Para a realização desta escolha foram desenvolvidos programas automáticos em MATLAB [68] que permitem realizar o controlo de qualidade dos dados e a interseção dos registos disponíveis em cada estação meteorológica e os projetos de reanálises, durante o período compreendido entre 01-01-2005 e 31-12-2015. De forma a manter a conformidade com as restantes reanálises, no caso do projeto MERRA2 a resolução temporal considerada foi de seis horas. Importa mencionar ainda que as estações meteorológicas estão localizadas em locais planos (aeroportos), com baixa rugosidade, o que torna o escoamento (velocidade e direção do vento) pouco dependente de efeitos locais. Deste modo, é possível uma comparação dos dados das reanálises com os dados das estações meteorológicas, uma vez que as reanálises tendem a não representar de forma fiável efeitos locais de microescala devido à reduzida resolução espacial.

✓ Velocidade do vento

Através das expressões 4.1, 4.2 e 4.3 calculou-se o *RMSE*, o Viés e a correlação entre os dados dos projetos reanálises e dados provenientes das três estações meteorológicas localizadas em Cabo Verde. Na Tabela 8 encontram-se representados os resultados desses parâmetros estatísticos para a velocidade do vento aos 10 metros para cada projeto de reanálises.

Tabela 8 – Análise do *RMSE*, o Viés e a correlação para cada projeto reanálise e para diferentes estações meteorológicas em termos da velocidade do vento aos 10m.

	GVAC (Sal)			GVNP (Santiago)			GVSV (São Vicente)		
	RMSE [m/s]	Correlação [adim.]	Viés [m/s]	RMSE [m/s]	Correlação [adim.]	Viés [m/s]	RMSE [m/s]	Correlação [adim.]	Viés [m/s]
Altitude (metros)	54			70			20		
CFSv2	1,76	0,71	-0,78	2,18	0,71	1,23	3,30	0,71	2,28
Era-Interim	1,69	0,70	-0,43	1,85	0,71	0,06	2,80	0,72	1,59
MERRA 2	1,50	0,74	-0,31	1,80	0,73	0,32	3,39	0,76	2,54
GFS	1,59	0,76	-0,76	1,75	0,74	0,29	2,61	0,77	1,46

Na Tabela 8 encontram-se destacados os valores para cada estação e para cada projeto, que apresentam a melhor performance nos parâmetros estatísticos analisados. Tanto para o *RMSE* como para a correlação, o projeto GFS apresenta a melhor performance. Relativamente ao Viés observa-se que o projeto reanálise que verifica-se um menor desvio para a estação GVAC é o MERRA2, para a estação GVNP é o Era-Interim e para a estação GVSV o GFS.

✓ Pressão atmosférica reduzida ao nível médio do mar

Através das expressões 4.1, 4.2 e 4.3 calculou-se o *RMSE*, o Viés e a correlação entre os dados da pressão atmosférica reduzida ao nível médio do mar dos projetos reanálises e dados provenientes das três estações meteorológicas localizadas em Cabo Verde, Tabela 9.

Tabela 9 – Análise do *RMSE*, Viés e a correlação para cada projeto reanálise e para diferentes estações meteorológicas em termos da pressão atmosférica.

	GVAC (Sal)			GVNP (Santiago)			GVSV (São Vicente)		
	RMSE [Pa]	Correlação [adim.]	Viés [Pa]	RMSE [Pa]	Correlação [adim.]	Viés [Pa]	RMSE [Pa]	Correlação [adim.]	Viés [Pa]
Altitude (metros)	54			70			20		
CFSv2	91,22	0,948	63,02	83,94	0,951	55,74	80,40	0,946	42,77
Era- Interim	88,65	0,953	62,17	84,10	0,956	59,96	81,95	0,958	55,63
MERRA2	72,30	0,959	41,16	69,93	0,962	42,32	65,25	0,957	22,07
GFS	69,38	0,960	37,34	62,29	0,966	34,25	58,08	0,963	11,53

Tal como para a velocidade do vento, a base de dados do projeto GFS apresenta a melhor performance para todos os parâmetros estatísticos analisados, como podemos constatar na Tabela 9.

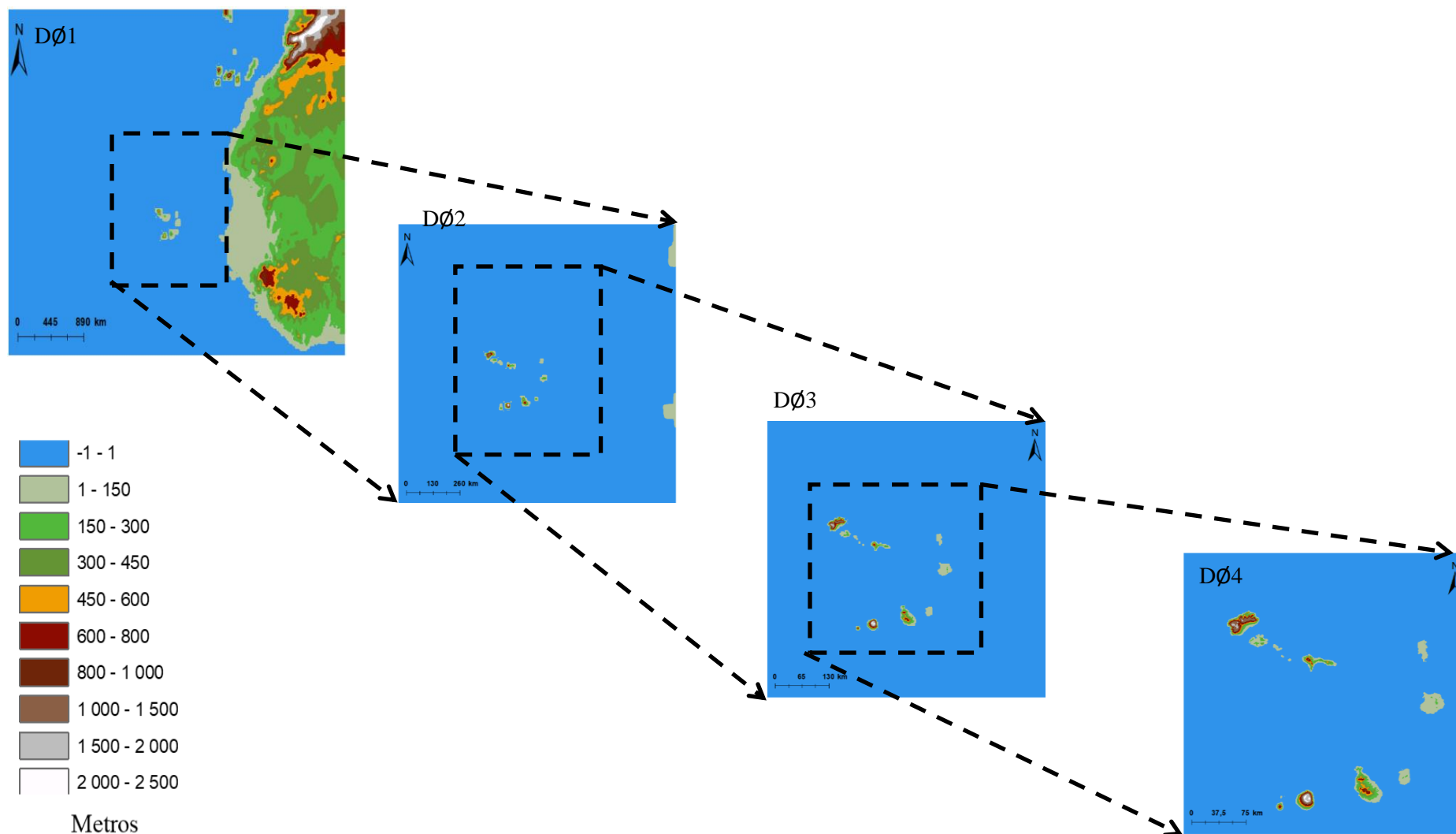
De acordo com a análise das correlações, do Viés e do *RMSE* para duas das variáveis mais importantes na caracterização do escoamento, a velocidade do vento e a pressão atmosférica reduzida ao nível do mar, conclui-se que o projeto reanálise que melhor se adequa aos registos das estações meteorológicas estudadas é o GFS. Assim, optou-se por utilizar como dados de entrada para as simulações numéricas do escoamento atmosférico no MM5 o projeto reanálise GFS.

Seguidamente são apresentados os domínios de simulação definidos no modelo numérico MM5.

4.1.2. Identificação dos domínios de simulação

Como previamente mencionado, a malha de simulação é definida dentro do módulo *TERRAIN*. Nesta dissertação, e tendo em consideração a resolução dos dados do projeto de reanálise (27 km) e o domínio final pretendido (1 km) definiram-se quatro domínios de simulação. Na Figura 4.2 encontra-se representado estes domínios, sendo que, os domínios DØ4, DØ3, DØ2 e DØ1 possuem resoluções de 27, 9, 3 e 1 km (quilómetros), respetivamente. A dimensão e a resolução espacial dos domínios devem ser definidas em função da dimensão da área em estudo e dos fenómenos atmosféricos que se pretende caracterizar. Para um país pequeno como Cabo Verde, para se obter resultados que caracterizam de forma adequada o recurso eólico no arquipélago, definiu-se o quarto domínio (DØ4) com uma alta resolução, 1×1 km, que pretende simular os efeitos da variação local da orografia e rugosidade do terreno, parâmetros estes que influenciam fortemente o escoamento junto à superfície. Estes quatro

domínios são tridimensionais (Tabela 10) e a simulação foi efetuada com um passo de tempo de 50 segundos, de forma a cumprir com os requisitos de estabilidade numérica. A resolução temporal dos resultados obtidos para os quatro domínios é de uma hora. A troca de informações entre os domínios é feita de forma unidirecional, o que significa que a transferência de dados ocorre num único sentido, dos domínios-mãe para os subdomínios. Os níveis sigmas foram definidos com base nas pressões de base e de topo que corresponde a 1 atmosfera ($\approx 10^5$ Pascals) e 1000 Pascals, respetivamente.



11Figura 4.2 – Domínio "mãe" (D01) e subdomínios (D02-4) definidos no MM5 para o desenvolvimento do Atlas do potencial eólico de Cabo Verde.

Tabela 10 – Características espaciais dos domínios de modelação do MM5.

Nº do Domínio	Dimensão da grelha nx - ny - nσ	Resolução espacial (km)
D01	130 – 170 – 25	27
D02	151 – 151 – 25	9
D03	226 – 226 – 25	3
D04	391 – 391 – 25	1

4.1.3. Calibração do modelo numérico

A escolha das parametrizações físicas do modelo numérico é extremamente dependente das condições meteorológicas de cada região, pelo que a calibração do modelo é um passo essencial na caracterização fiável do escoamento no local em estudo.

De modo a calibrar o modelo MM5 realizaram-se vários testes de sensibilidade às diferentes opções de parametrização disponíveis dentro de cada opção física. Na ausência de dados disponíveis para uma altura do eixo do rotor dos aerogeradores (tipicamente 80 metros), a calibração foi efetuada recorrendo aos dados das estações meteorológicas de superfície anteriormente apresentadas.

Devido à sazonalidade típica de Cabo Verde, que é caracterizada por duas estações do ano – subcapítulo 3.1.5. (Clima característico de Cabo Verde) – a calibração foi feita com base em dados simulados para dois meses distintos, abril e agosto de 2015.

No anexo A apresentam-se os resultados detalhados dos vários parâmetros estatísticos obtidos de acordo com as diferentes parametrizações testadas. Na Tabela 11 apresentam-se as parametrizações físicas que mais se adequam à região em estudo e que foram utilizadas durante as simulações para obtenção do Atlas do potencial eólico de Cabo Verde.

Tabela 11 – Identificação das parametrizações mais adequadas a variabilidade da velocidade do vento na região em estudo, com base nos testes de sensibilidade efetuados.

Opções físicas	Microfísica (IMPHYS)	Cumulus (ICUPA)	Camada Limite Planetária (IBLTYP)	Domínios - Resolução (km)
Parametrizações	4- <i>Simple ice</i>	6- <i>MRF</i>	2- <i>Blackadar</i>	1º- 27 km
	4- <i>Simple ice</i>	6- <i>MRF</i>	2- <i>Blackadar</i>	2º- 9 km
	4- <i>Simple ice</i>	1- <i>None</i>	2- <i>Blackadar</i>	3º- 3 km
	4- <i>Simple ice</i>	1- <i>None</i>	2- <i>Blackadar</i>	4º- 1 km

4.2. Metodologia para a identificação do Potencial Eólico Sustentável

A identificação do potencial eólico sustentável para o arquipélago de Cabo Verde é feita com base no manuseamento de mapas (e informação relevante) num SIG, no caso presente, ArcGIS. Como referido anteriormente, o primeiro passo consiste na obtenção do mapa do recurso eólico (mapa da velocidade do vento) e, posteriormente, a identificação das restrições e constrangimentos ao aproveitamento do recurso eólico. Por último, depois de agregada toda a informação georreferenciada, é possível identificar as zonas de aproveitamento sustentável do recurso eólico. Na Figura 4.3 encontra-se esquematizada a metodologia do cálculo do Potencial Eólico Sustentável para o arquipélago de Cabo Verde.

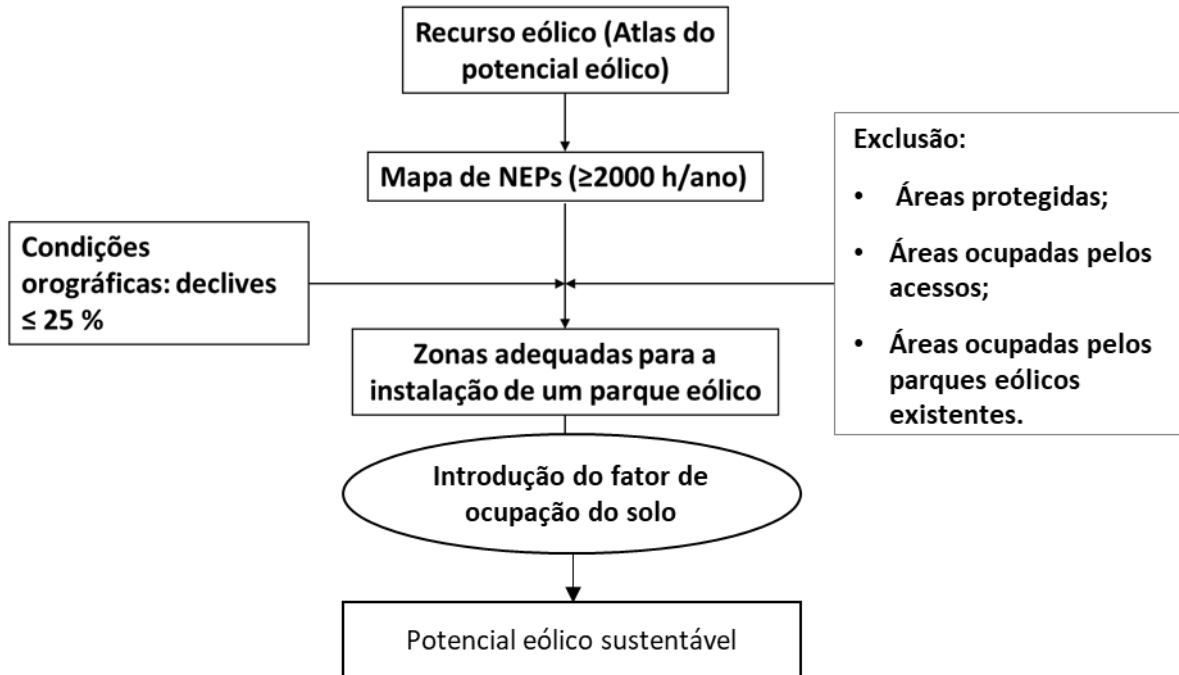


Figura 4.3 – Esquema simplificado da metodologia do cálculo do potencial eólico sustentável.

De acordo com a Figura 4.3, são necessários mapas *raster* para a análise espacial. Desta forma, toda a informação recolhida teve de ser transformada em mapas *raster* para manipulação em ArcGIS.

Matematicamente, o potencial sustentável é dado por:

$$P_i = \alpha \beta \eta_i \gamma_i \chi_i \quad (4.5)$$

Onde P_i é o Potencial Eólico Sustentável obtido dentro do polígono i (um polígono representa um concelho específico) em MW, α, β e η_i são parâmetros constantes e γ_i, χ_i e w_i são expressos da seguinte forma:

$$\alpha = EL \quad (4.6)$$

$$\beta = \frac{Pot}{8760} \quad (4.7)$$

$$\eta_i = SO_i \quad (4.8)$$

$$\gamma_i = \frac{\delta_y \delta_x D^2}{A_i} \quad (4.9)$$

$$\chi_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} NEPs_{ji}}{N} \quad (4.10)$$

Onde:

EL – Coeficiente de perdas equivalentes de energia potencial em MW; Pot – Potência nominal de uma turbina eólica (MW) usado para calcular o NEPs; 8760 – Número de horas anuais; SO_i – Fator de ocupação do solo correspondente ao polígono i ; δ_y e δ_x – constantes utilizadas para definição da distância inter-turbina na direção x e y, respetivamente; D – o diâmetro da turbina; A_i – a área do polígono i ; $NEPs_{ji}$ – NEPs depois de aplicadas as restrições para os pontos da grelha j dentro da área do polígono i , e N – o número total de pixéis dentro do polígono i .

Nas subseções seguintes apresentam-se, de uma forma detalhada, todos os procedimentos aplicados para determinar o potencial eólico sustentável de Cabo Verde. Os procedimentos são exemplificados recorrendo a ilha de Santiago, no entanto, nos Anexos de C a G encontram-se apresentados os resultados para as restantes ilhas do arquipélago de Cabo Verde. Por ser uma ilha desabitada, a ilha de Santa Luzia não foi considerada nos estudos efetuados.

4.2.1. Determinação do NEPs

Para garantir a sustentabilidade económica de parques eólicos é necessário incluir uma condição limiar no recurso eólico, limiar este que representa o mínimo aceitável de produção (em NEPs) de uma turbina eólica ou parque eólico instalado numa determinada região. Nesse sentido, o primeiro passo depois da obtenção do Atlas do potencial eólico é a escolha de uma turbina eólica adequada ao local. Por se tratar de um conjunto de ilhas, onde o consumo individual de cada uma é reduzido [14], escolheu-se uma turbina com uma potência de 850 kW (Vestas V52) [69]. Do ponto de vista de integração desta fonte de energia estocástica no sistema electroprodutor, esta escolha é usualmente aplicada em sistemas de isolados/pequena escala para mitigar o impacto de ocorrências de falhas numa das turbinas. Adicionalmente, a escolha deste turbina eólica encontra-se relacionada com a existência deste modelo nos parques eólicos existentes no país [2]. Não obstante, também se apresenta a identificação do potencial eólico sustentável recorrendo a turbina eólica Vestas V80 com 2 MW de potência nominal [70].

As curvas de potência utilizadas neste trabalho foram obtidas recorrendo à base de dados existente no LNEG (informação que foi sendo disponibilizada por fabricantes ao longo dos anos) e referem-se à densidade do ar padrão [71]. Uma das características mais importantes de uma turbina eólica é a sua curva de potência, ou seja, a potência gerada pela turbina em função da velocidade do vento. Assim, na Figura 4.4 encontram-se as curvas de potência dos modelos usados neste trabalho.

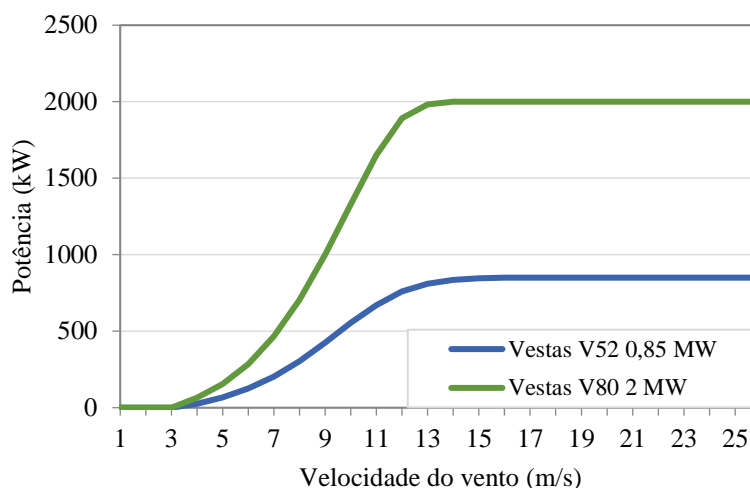


Figura 4.4 – Curvas de potência das turbinas eólicas: Vestas V52 de 850 kW e Vestas V80 de 2000 kW.

4.2.2. Declive do terreno

O estudo do declive do terreno constitui um parâmetro essencial no planeamento do aproveitamento do recurso eólico, uma vez que, fortes declives induzem turbulência no escoamento provocando *i)* flutuações de carga nas estruturas de uma turbina eólica, aumentando significativamente os esforços nas pás e vibrações, reduzindo assim o tempo de vida útil e *ii)* uma diminuição da energia disponível porque as turbinas eólicas não reagem a flutuações rápidas na velocidade ou direção do vento. Neste estudo, os locais considerados como sendo de declives ótimos para a instalação de um parque eólico foram aqueles onde se verificam declives inferiores ou iguais a 25 % [29].

De forma a se obter o mapeamento do declive do terreno na região em estudo, recorreu-se ao mapa da elevação do terreno disponibilizado gratuitamente pelo *United State Geological Survey* (USGS) [72], com uma resolução espacial de 30 metros. O mapeamento do declive foi obtido através do *software* ArcGIS, onde se aplicou a função que calcula o declive, através do comando *slope*. Esta função permite obter um mapa de declives em graus (ângulo de inclinação do terreno), sendo necessário a conversão dos valores obtidos para percentagem de inclinação. Esta conversão foi obtida por via da função *Raster Calculator* (*Spacial Analyst*), da seguinte forma:

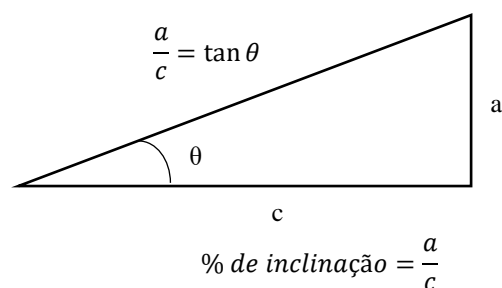


Figura 4.5 – Transformação dos declives de graus (°) para percentagem (%) de inclinação.

Onde a corresponde à distância na vertical, c corresponde à distância na horizontal e θ correspondente ao ângulo de inclinação do terreno.

A título de exemplo, na Figura 4.6 apresenta-se o declive em percentagem de inclinação da ilha de Santiago, sendo que, as figuras correspondentes às restantes ilhas de Cabo Verde são apresentadas no Anexo C.

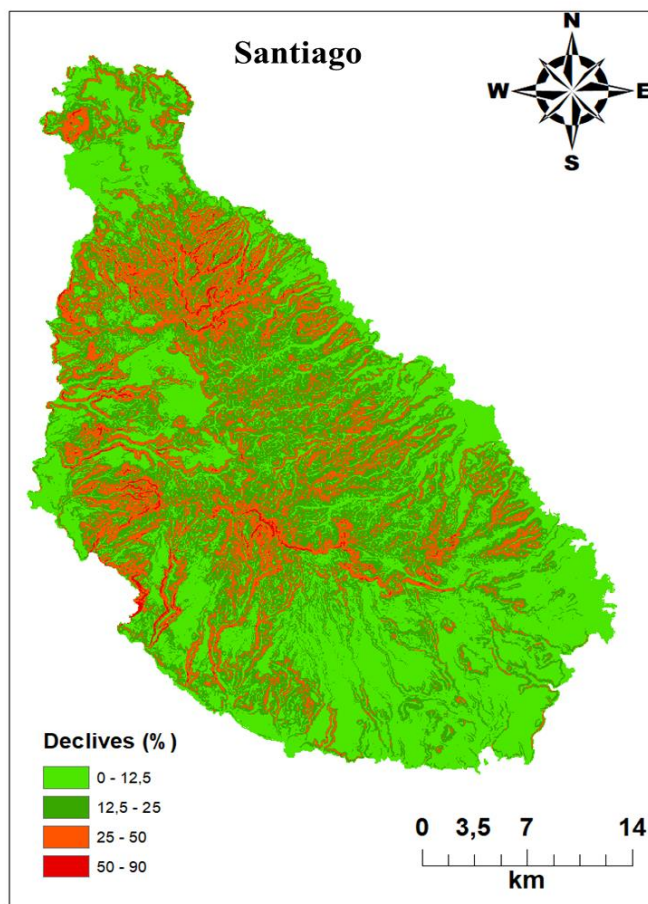


Figura 4.6 – Declive de terreno (%) para a ilha de Santiago.

4.2.3. Restrições Ambientais, acessos e parques eólicos existentes em Cabo Verde

Um dos principais objetivos do uso das fontes de energias renováveis passa pela diminuição dos impactos ambientais na produção da energia. Em termos das restrições ambientais, de acordo com o Decreto-Lei nº 3/2003 [73] em vigor em Cabo Verde, é proibido o uso das zonas classificadas como protegidas para atividades de exploração dos recursos nelas existentes sem a permissão das autoridades competentes. Desta forma excluiu-se todas as zonas classificadas como protegidas (reservas naturais, parques naturais, etc.) dos locais de possível aproveitamento eólico. Adicionalmente, considerou-se uma distância de 200 metros das zonas protegidas como sendo a distância mínima de segurança para a instalação de um parque eólico não permitindo o sobrevoo dos terrenos vizinhos por parte das turbinas eólicas. Para tal, fez-se um contorno de 200 metros a volta dos polígonos que representam as referidas áreas (áreas protegidas e acessos), Figura apresentado no anexo E. É de referir que, Cabo Verde possui outras regiões classificadas onde a ocupação e a exploração de recursos nelas existentes são limitadas, no entanto, neste trabalho considerou-se apenas as zonas classificadas como reservas e parques naturais, onde as informações disponíveis são credíveis e fidedignas [73].

Os acessos são importantes quando se estuda a viabilidade de instalação de um parque eólico, uma vez que a existência de acessos permite o transporte dos equipamentos, minimizando assim, a necessidade de construção de novas estradas, o que contribui para a redução dos custos associados à construção de um parque eólico. No entanto, para identificação do potencial eólico, as áreas ocupadas

pelos acessos são excluídas assim como as áreas circundantes para evitar o sobrevoo. Neste trabalho, a área circundante considerada foi de 200 metros. A rede rodoviária de Cabo Verde [74], obtida inicialmente, encontrava-se desatualizada pelo que foi necessário efetuar uma atualização através da edição no ArcGIS. A edição consistiu na correção/adição de estradas que não se encontravam no ficheiro *shapefile* original.

Em termos da área ocupada pelos parques eólicos, Cabo Verde conta com quatro parques eólicos instalados em diferentes ilhas, Santiago, Boavista, Sal e São Vicente. A localização dos quatro parques eólicos, e as suas capacidades instaladas, encontram-se apresentadas na Figura 1.3 e Tabela 2. Sabendo que não é possível instalar um novo parque eólico numa área onde já se encontra um parque eólico instalado, é feita a exclusão dessa área na identificação do potencial eólico sustentável.

Na Figura 4.7 apresenta-se o mapa dos acessos, das zonas protegidas e das zonas ocupadas pelos parques eólicos existentes no país para a ilha de Santiago. No anexo E apresentam-se os mapas detalhados para as restantes ilhas.

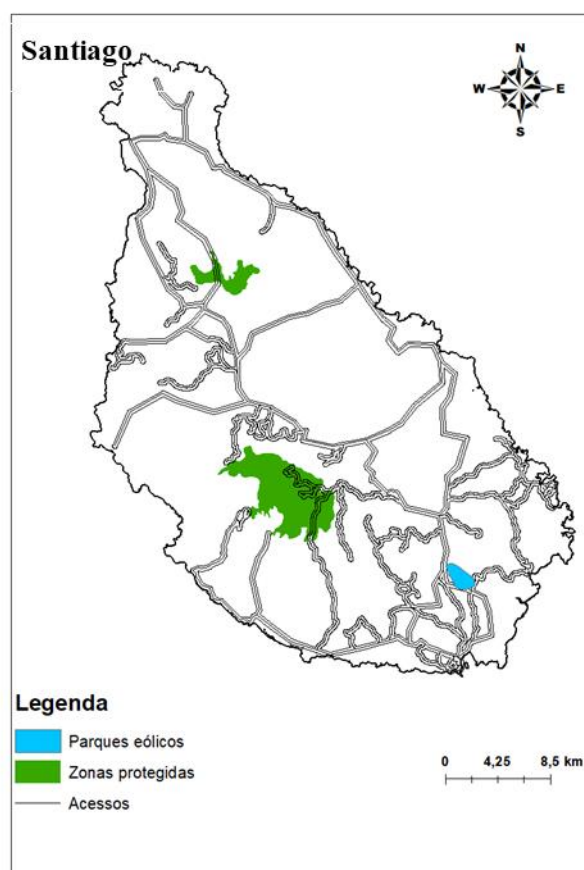


Figura 4.7 – Mapa dos acessos, das zonas protegidas (reservas/parques naturais) e da área ocupada pelo parque eólico para a ilha de Santiago.

4.2.4. População e ocupação do solo

A concentração demográfica é um aspeto relevante no planeamento do aproveitamento eólico, uma vez que *i)* a presença de habitações reduz o espaço disponível para desenvolvimento de projetos e *ii)* os aglomerados populacionais constituem obstáculos que influenciam a circulação do vento. O impacto da fixação da população e do desenvolvimento das suas atividades para cada concelho é expresso através do fator de ocupação do solo, que é obtido da seguinte forma:

$$\text{Ocupação do solo} = \frac{\text{Densidade Populacional [pessoas/km}^2] \times A_{\text{casa}}[\text{km}^2/\text{casa}]}{\text{N}^\circ \text{de pessoas/casa}} \quad (4.11)$$

$$\text{Fator de ocupação do solo} = 1 - \text{Ocupação do solo} \quad (4.12)$$

Onde A_{casa} corresponde a área ocupada por uma habitação residencial.

Para o cálculo do fator de ocupação do solo considerou-se que uma habitação ocupa em média 70 m² e que em cada habitação vive, em média, uma família constituída por 4 pessoas de acordo com os dados disponibilizados pelo INE (Instituto Nacional de Estatística de Cabo Verde) [75].

Na Figura 4.8 apresenta-se a densidade populacional [75] na ilha de Santiago. No anexo D encontram-se os mapeamentos da densidade populacional para as restantes zonas administrativas do país.

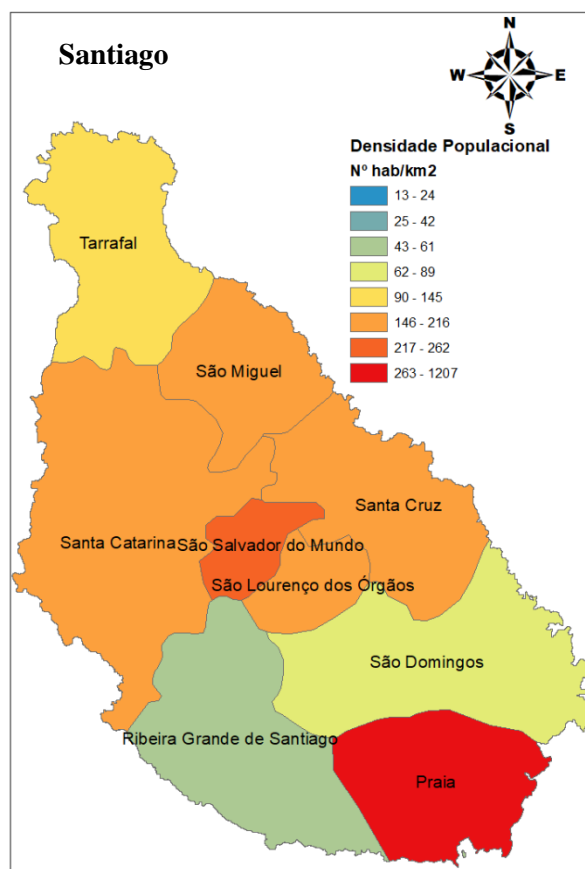


Figura 4.8 – Mapeamento da densidade populacional para a ilha de Santiago.

Na Tabela 12 apresentam-se os resultados do fator de ocupação do solo - SO_i - para os diferentes concelhos.

Tabela 12 – Fator de ocupação do solo para os diferentes concelhos do arquipélago de Cabo Verde.

Ilha	Concelhos	Nº de habitantes	Área (km²)	Fator de ocupação do solo
Boa Vista	Boa Vista	9162	682,21	0,999765
Brava	Brava	5995	74,32	0,998588
Maio	Maio	6952	292,25	0,999584
Fogo	Mosteiros	9524	86,86	0,998081
	São Filipe	22248	362,05	0,998925
	Santa Catarina do fogo	5299	59,22	0,998434
Santo Antão	Paúl	6997	51,91	0,997641
	Porto Novo	18028	631,52	0,999500
	Ribeira Grande	18890	182,42	0,998188
Santiago	Ribeira Grande de Santiago	8325	151,79	0,999040
	Praia	131719	109,09	0,978871
	São Domingos	13808	168,88	0,998569
	São Lourenço dos Órgãos	7388	38,78	0,996666
	São Miguel	15648	85,96	0,996814
	São Salvador do Mundo	8677	33,09	0,995412
	Santa Catarina	43297	243,41	0,996887
	Tarrafal	18565	128,45	0,997471
São Vicente	São Vicente	76140	294,6	0,995477
São Nicolau	Tarrafal de São Nicolau	5237	124,58	0,999264
	Ribeira Brava	7580	255,91	0,999482
Sal	Sal	25779	243,47	0,998147

Na Tabela 13 encontra-se apresentado as informações referentes a diferentes níveis de ocupação do solo, segundo [29].

Tabela 13 – Classificação da ocupação do solo [29].

Concentração demográfica	Fator de ocupação do solo	Classificação da ocupação do solo
Bastante povoado	≈ 0,1	Elevada
Povoado	≥ 0,2 e < 0,4	Média
População reduzida	≥ 0,4	Baixa

De acordo com os valores obtidos para o fator de ocupação do solo em todos os concelhos de Cabo Verde, Tabela 12, verifica-se que estes são superiores a 0,4, ou seja, de acordo com a classificação apresentada na Tabela 13, todos os concelhos de Cabo Verde apresentam uma baixa ocupação do solo.

4.2.5. União das áreas de restrição

As áreas totais das restrições ambientais (como as zonas protegidas – reservas e parques naturais) e das restrições do terreno (declive superior a 25 %, áreas abrangidas pelas infraestruturas rodoviárias e parques eólicos com um contorno de 200 metros para ambos os lados das estradas) foram processadas no ArcGIS, permitindo obter o mapeamento das zonas de exclusão para aproveitamento

eólico para todas as ilhas de Cabo Verde. Na Figura 4.9 encontra-se apresentado o exemplo das áreas de restrição para a ilha de Santiago e as restantes ilhas encontram-se apresentadas no anexo F.

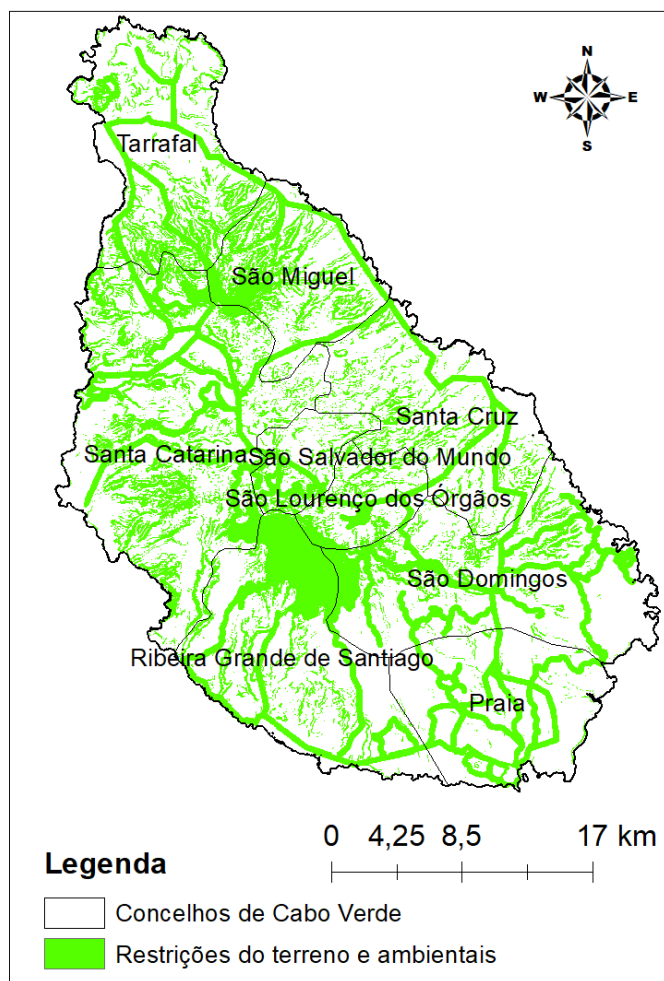


Figura 4.9 – Restrições ambientais e de terreno para a ilha de Santiago.

5. Apresentação e discussão de resultados

Nesta secção são apresentados e discutidos os resultados obtidos através da aplicação do modelo numérico MM5 e os mapas gerados através do ArcGIS.

5.1. Atlas do Potencial Eólico de Cabo Verde

Nesta secção são apresentados os mapeamentos do campo médio do vento e a sua direção, os mapeamentos do NEPs e a validação dos resultados de mesoescala.

5.1.1. Validação das simulações de mesoescala

A validação dos resultados obtidos por via de simulação de mesoescala é feita através da: *i*) comparação entre os valores médios mensais da velocidade do vento simulados e registados nas três estações meteorológicas usadas neste trabalho; *ii*) comparação das direções do vento simuladas e registados nestas mesmas estações meteorológicas através da análise das respetivas rosas do vento; e *iii*) análise do desvio global, do erro médio quadrático e da correlação entre os dados observados e simulados.

Nas figuras seguintes, Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3, apresentam-se os valores das velocidades médias mensais do vento observados (Obs) e simulados (Sim) para as estações GVAC, GVNP e GVSV. As médias mensais foram feitas com base nos dados horários observados e simulados compreendidos entre fevereiro de 2015 e janeiro de 2017.

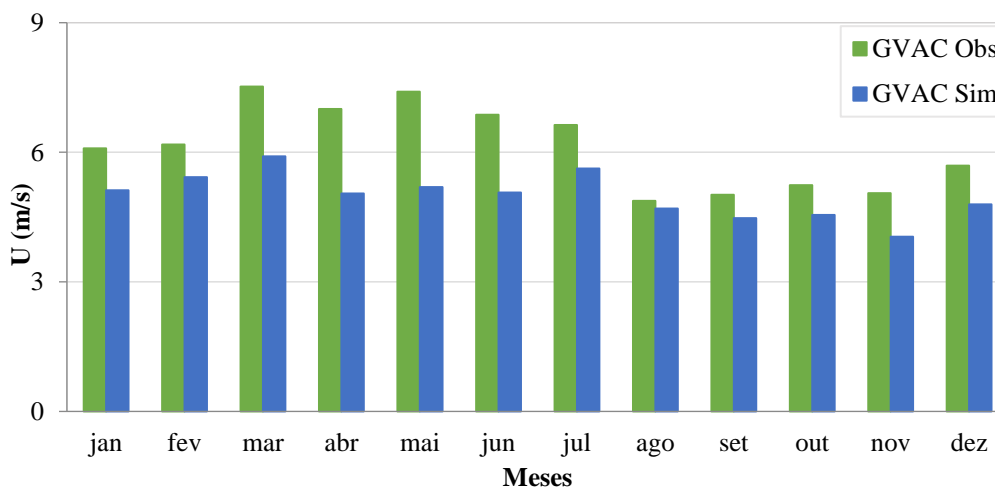


Figura 5.1 – Perfil anual da velocidade média do vento dos dados: a) observados e b) simulados para a estação meteorológica GVAC - Sal.

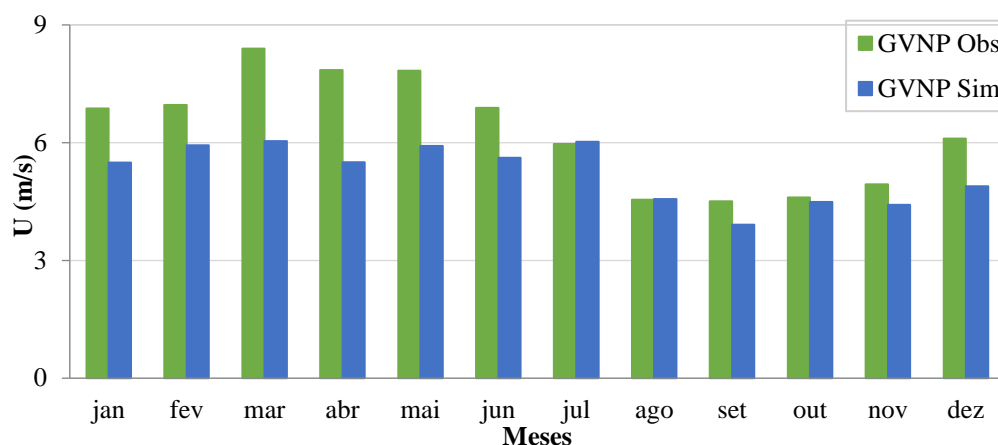


Figura 5.2 – Perfil anual da velocidade média do vento dos dados: a) observados e b) simulados para a estação meteorológica GVNP - Santiago.

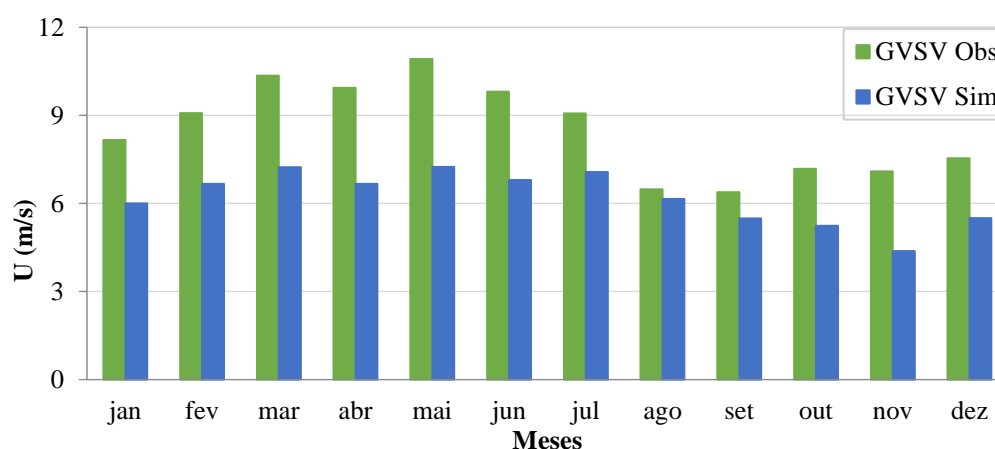


Figura 5.3 – Perfil anual da velocidade média do vento dos dados: a) observados e b) simulados para a estação meteorológica GVSV – São Vicente.

Da análise das três figuras, conclui-se que, em média, o modelo numérico MM5 subestimou a velocidade média do vento nas três estações analisadas. Ao longo do ano pode-se destacar duas estações do ano distintas, a primeira estação engloba os meses de janeiro a junho onde se verifica uma velocidade média superior ao período de julho a dezembro, correspondente à segunda estação, quer para os dados registados nas estações meteorológicas como para os dados simulados.

Observa-se que a amplitude da diferença da velocidade simulada/observada no período de janeiro a junho é superior à verificada no período de julho a dezembro nas três estações meteorológicas. Este viés na velocidade do vento encontra-se em linha com os resultados dos testes de sensibilidade efetuados no processo da calibração do modelo numérico, Anexo A, onde foi possível verificar que o desvio (Viés) entre os dados registados nas estações meteorológicas e os dados simulados pelo MM5 foi superior para o mês de abril, quando comparado com o desvio observado no mês de agosto.

Para avaliar a validade dos resultados obtidos, na Tabela 14, apresentam-se os seguintes parâmetros mensais obtidos para as estações meteorológicas disponíveis: velocidade média do vento observada e simulada, respetivamente, Viés, RMSE e correlação entre as velocidades médias mensais observadas e simuladas.

Tabela 14 – Avaliação da performance do modelo MM5 no período entre fevereiro 2015 e fevereiro 2017 para as três estações disponíveis – perfis anuais e parâmetros estatísticos (Viés, RMSE e correlação) para a altura de 10 metros.

Velocidades médias mensais: Valores observados (estações) e simulados (MM5)						
	GVAC - Sal		GVNP – Santiago		GVSV – São Vicente	
Meses	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
Jan	6.09	5.12	6.87	5.50	8.17	6.00
Fev	6.18	5.43	6.96	5.94	9.08	6.67
Mar	7.52	5.90	8.39	6.04	10.35	7.24
Abr	7.00	5.05	7.85	5.50	9.93	6.67
Mai	7.40	5.20	7.83	5.92	10.92	7.25
Jun	6.87	5.07	6.89	5.62	9.81	6.80
Jul	6.63	5.63	5.96	6.03	9.07	7.07
Ago	4.87	4.70	4.55	4.56	6.48	6.16
Set	5.02	4.47	4.51	3.91	6.39	5.49
Out	5.24	4.55	4.61	4.49	7.18	5.24
Nov	5.05	4.05	4.94	4.41	7.09	4.37
Dez	5.69	4.80	6.11	4.89	7.54	5.50
Média anual	6.13	4.98	6.25	5.20	8.48	6.19
Viés [m/s] *	+ 1,11		+ 1,02		+ 2,21	
RMSE [m/s]	2,69		2,84		4,25	
**						
Correlação [Adim.]⁹	0.81		0.85		0.82	

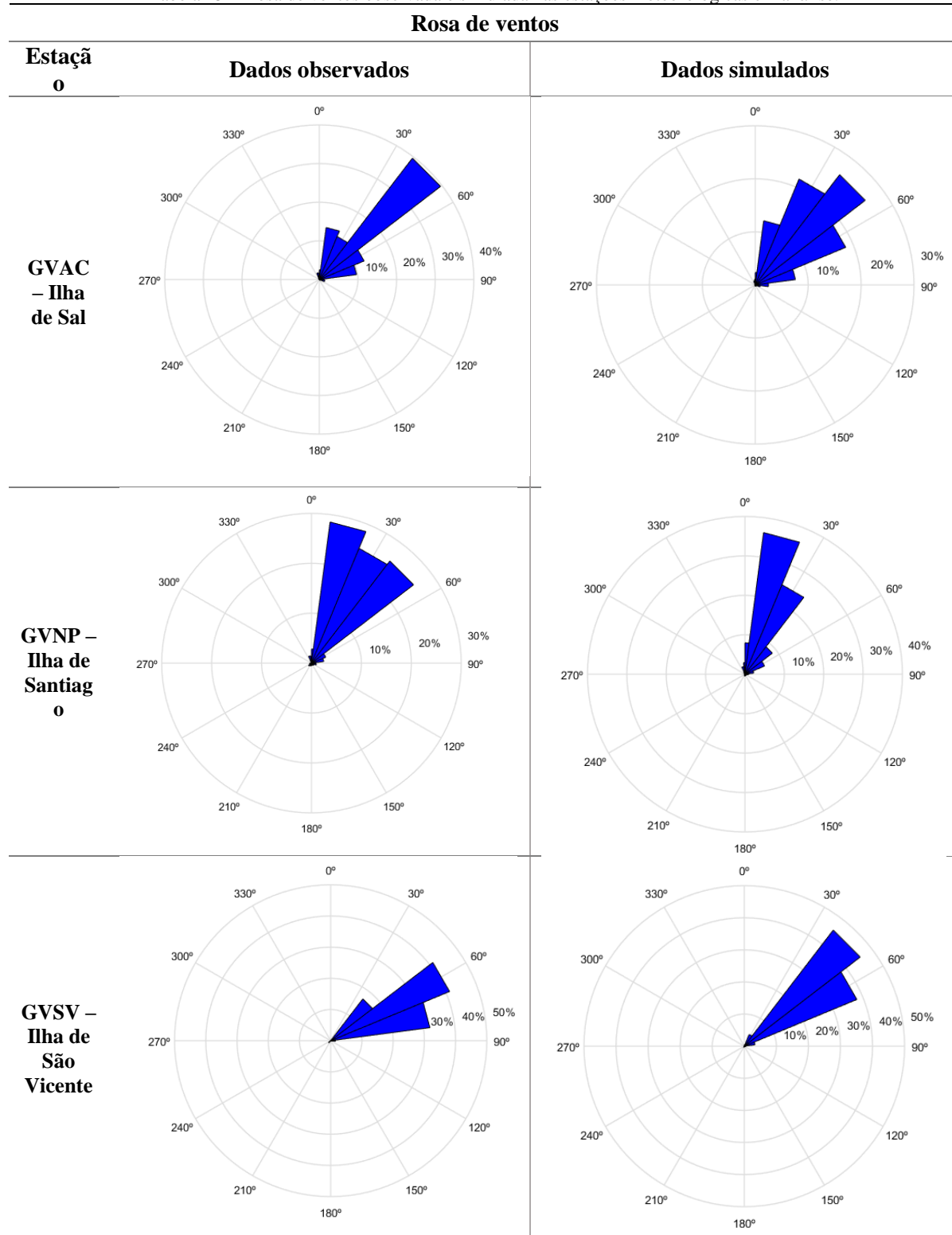
*Desvio global **Erro Médio Quadrático global entre os dados observados e simulados

A estação GVNP, situada na ilha de Santiago, possui um menor desvio, onde a velocidade média observada é superior à velocidade média simulada em 1 m/s. Por outro lado, a estação GVSV, situada na ilha de São Vicente, possui um maior desvio, onde o valor da velocidade média medida na estação é superior à velocidade média simulada em 2,2 m/s. O Viés normalizado pela velocidade média observada apresenta valores que variam entre 16% e 26% estação GVNP - Santiago e GVSV – São Vicente, respetivamente. Uma das razões que podem ajudar a compreender estes desvios, é o facto de o modelo numérico não ter em conta as pequenas variações no relevo do terreno, uma vez que este faz uma suavização do relevo, perdendo assim a capacidade de simular de forma precisa os fenómenos locais que influenciam o escoamento, especialmente nos níveis mais baixos da atmosfera. Uma outra razão está nas localizações das estações meteorológicas, como é o caso da estação GVSV, que situa num corredor de circulação, o que faz com que nesta zona haja uma maior concentração do escoamento. Devido à resolução espacial do modelo, este fenómeno local pode não ser corretamente simulado pelo modelo numérico. Pese embora os desvios significativos observados, os valores da correlação das velocidades médias mensais são superiores a 0.8 em todas as estações demonstrando que o modelo consegue reproduzir a variabilidade inter-anual da intensidade do vento na região em análise.

Para além da validação da velocidade do vento, efetuou-se, também, a validação da direção do vento nas três estações meteorológicas. Esta validação consiste na comparação das rosas de ventos observadas e simuladas em cada uma das estações, Tabela 15.

⁹ As correlações apresentadas correspondem à correlação entre os valores médios mensais da velocidade do vento observado nas estações meteorológicas e os valores simulados pelo modelo numérico de mesoescala MM5.

Tabela 15 – Rosa de ventos observada e simulada nas estações meteorológicas em análise.



Da análise das rosas de vento, conclui-se que as direções do vento simuladas são bastante concordantes com as direções do escoamento medidas nas estações meteorológicas. Assim, é possível verificar que a direção predominante do vento nos dados observados e simulados é de Nordeste.

Na Tabela 16 podem-se observar os valores das direções médias observadas e simuladas nas três estações meteorológicas estudadas, o desvio global existente entre as direções observadas e simuladas e o desvio entre as médias das direções observadas e simuladas.

Tabela 16 – Direções médias do escoamento observadas e simuladas nas três estações meteorológicas.

Parâmetro	Estação meteorológica		
	GVAC	GVNP	GVSV
Direção Observada [°]	43,01	31,47	62,11
Direção Simulada [°]	43,22	25,20	50,66
Desvio da direção média (Observado – Simulado) [°]	-0,21	6,27	11,45
Desvio global entre as direções observadas e simuladas [°]	23,49	29,30	20,91

Desta forma, através da comparação entre os dados da intensidade e da direção média do Atlas e os dados medidos nas estações meteorológicas, pode-se afirmar que as estimativas feitas pelo modelo numérico MM5 são representativas do recurso eólico para o arquipélago de Cabo Verde.

5.1.2. Mapeamento do campo médio da velocidade e direção do vento

Os mapas do campo médio do vento e a sua direção, obtidos neste estudo resultaram da simulação de dois anos de dados, correspondentes ao período entre fevereiro de 2015 e janeiro de 2017. Os mapas foram extraídos para os 52 e 80 metros de altura, respetivamente. Estas alturas correspondem aos dois tipos de turbinas eólicas, Vestas V52 850 kW [69] e Vestas V80 2000 kW [70], utilizadas para estimar o potencial sustentável para o arquipélago de Cabo Verde.

Dado que o período simulado é de apenas dois anos, e de forma a enquadrar climatologicamente o período simulado, neste trabalho procedeu-se ao estudo da variabilidade interanual da velocidade do vento para a região em análise. Uma vez que o período compreendido entre fevereiro de 2015 e janeiro de 2017 encontra-se próximo da média climatológica (últimos 20 anos), não se procedeu a correção dos dados. No anexo B apresenta-se de forma detalhada a análise efetuada.

Na Figura 5.4 podem-se observar os mapas da intensidade e direção da velocidade do vento simulados para Cabo Verde aos 52 metros de altura, com uma resolução espacial de 1x1 km.

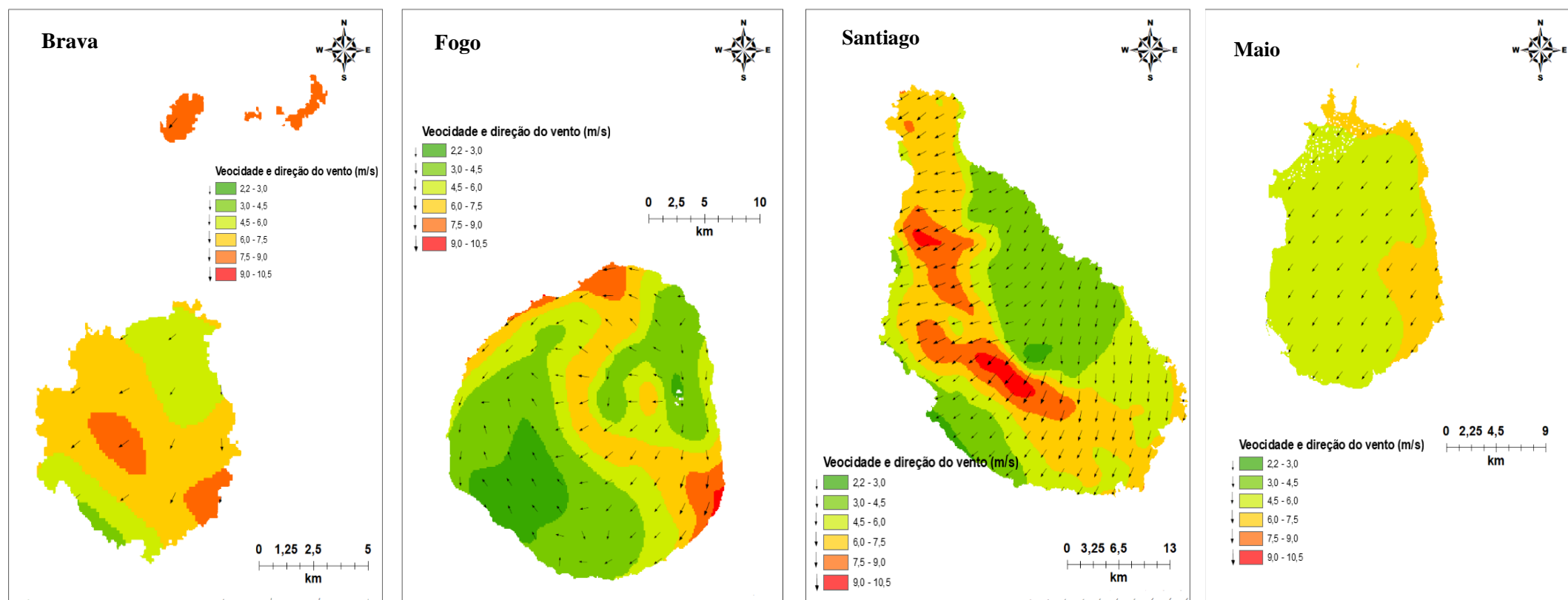


Figura 5.4 – Mapa médio simulado da intensidade e direção do vento para uma altura de 52 metros.

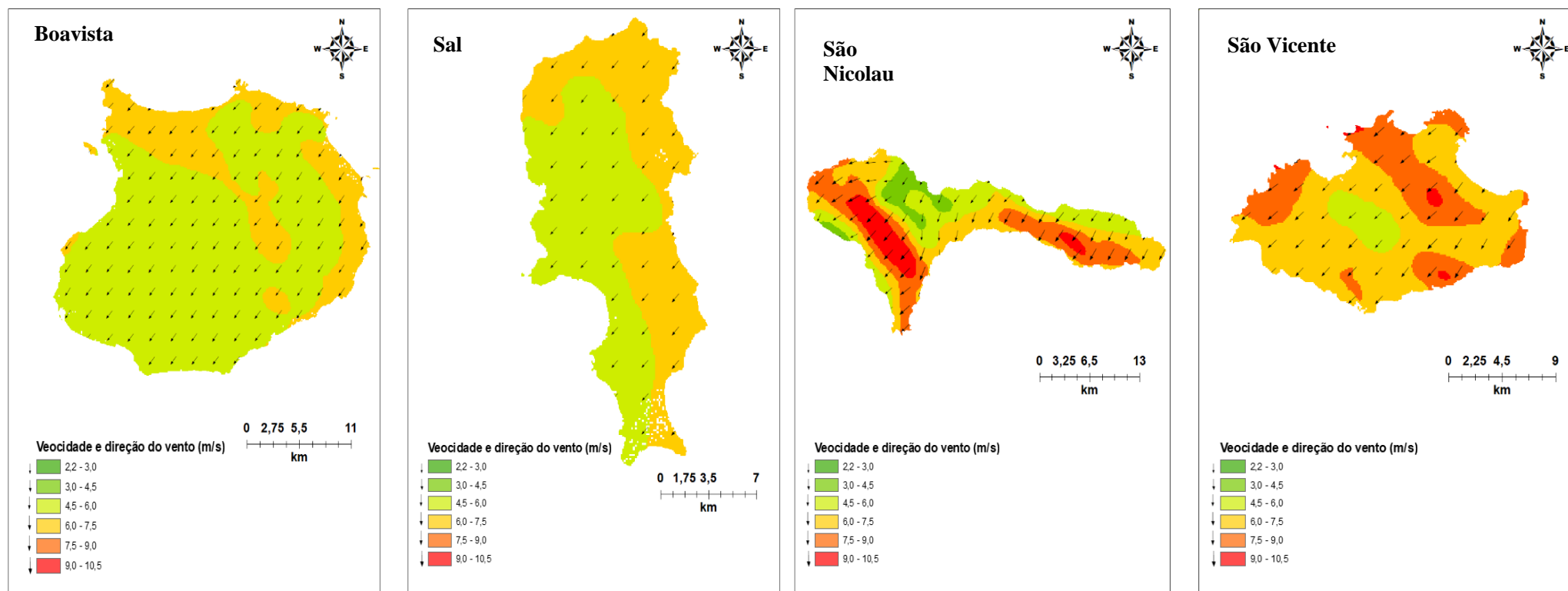


Figura 5. 4 – Mapa médio simulado da intensidade e direção do vento para uma altura de 52 metros (Continuação).

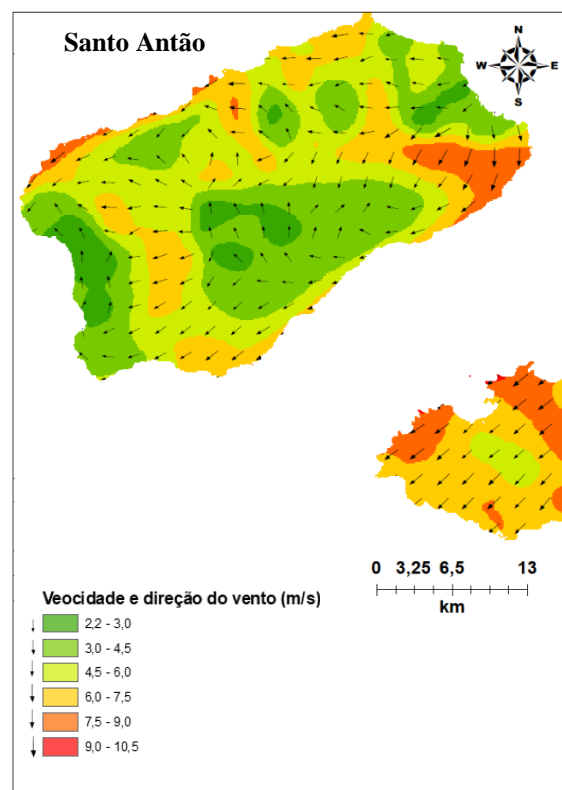


Figura 5.4 – Mapa médio simulado da intensidade e direção do vento para uma altura de 52 metros (Continuação).

Da análise dos mapas, conclui-se que a direção predominante do vento em Cabo Verde é de nordeste (NE), o que é esperado tendo em conta o tipo de circulação existente nesta zona do globo fortemente influenciada pelos ventos alíseos. Esta predominância é ainda mais clara quando se observa o escoamento sobre as ilhas do Sal, Boavista e Maio, onde o terreno é maioritariamente plano. Nestas ilhas verifica-se igualmente uma maior homogeneidade da intensidade do vento. Já, nas ilhas de Santo Antão e de Fogo, onde o terreno apresenta um relevo irregular e montanhoso, a direção e intensidade do escoamento é bastante variável no espaço, como seria de esperar, visto que as características locais, neste caso as montanhas influenciam a trajetória do escoamento. O valor médio mais intenso da velocidade do vento foi identificado na ilha de São Nicolau (10,15 m/s).

Na Figura 5.5 são apresentados os mapas do campo médio do vento e a sua direção para uma altura de 80 metros.

Como esperado os resultados aos 80m apresentam uma ligeira intensificação da intensidade do vento em todas as ilhas. No que diz respeito à direção, não se observam alterações na direção predominante do vento em altitude.

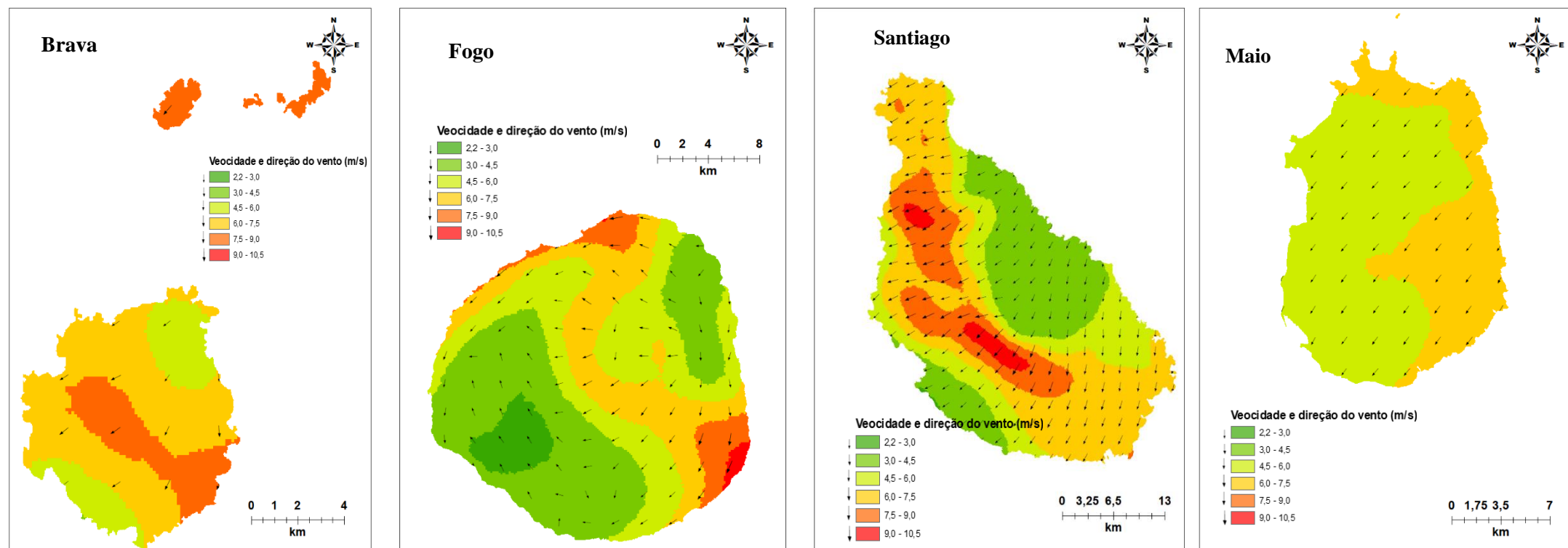


Figura 5.5 – Mapa médio simulado da intensidade e direção do vento para uma altura de 80 metros.

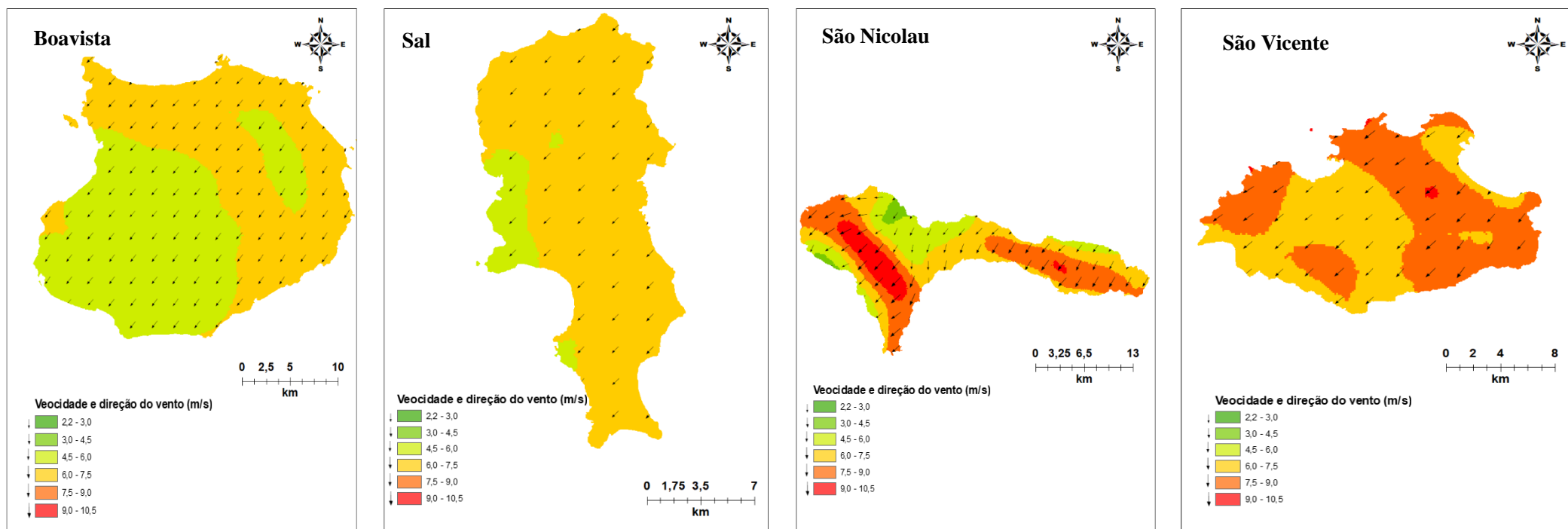


Figura 5.5 – Mapa médio simulado da intensidade e direção do vento para uma altura de 80 metros (Continuação).

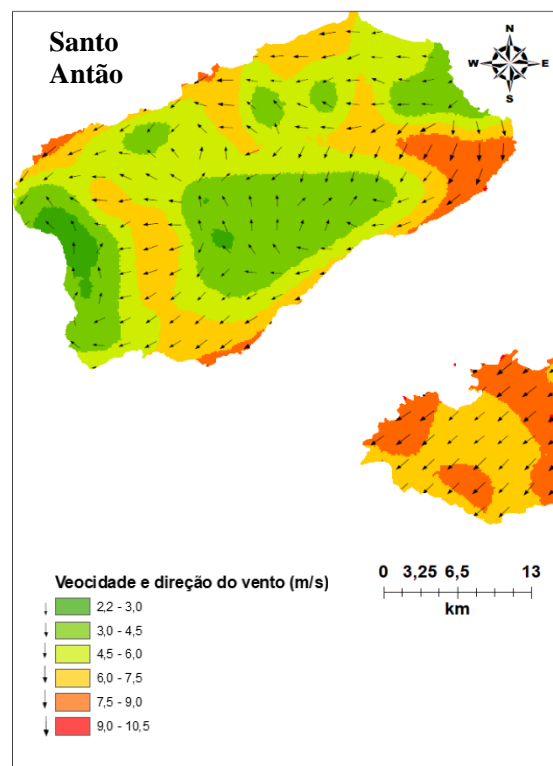


Figura 5.5 – Mapa médio simulado da intensidade e direção do vento para uma altura de 80 metros (Continuação).

Depois de apresentados os campos médios da velocidade e direção do vento, de seguida apresenta-se o mapeamento do campo do número de horas à potência nominal.

5.1.3. Mapeamento do campo do número de horas equivalentes a potência nominal (NEPs)

Os mapas do indicador NEPs para as duas turbinas, necessários para o cálculo do potencial sustentável, foram obtidos através dos mapas dos parâmetros de Weibull, forma (k) e de escala (A), respetivamente. Os mapas destes parâmetros podem ser consultados no anexo G. Assim, na Figura 5.6 e na Figura 5.7 apresentam-se os mapeamentos do NEPs por ilha para os dois tipos de turbinas eólicas consideradas neste trabalho.

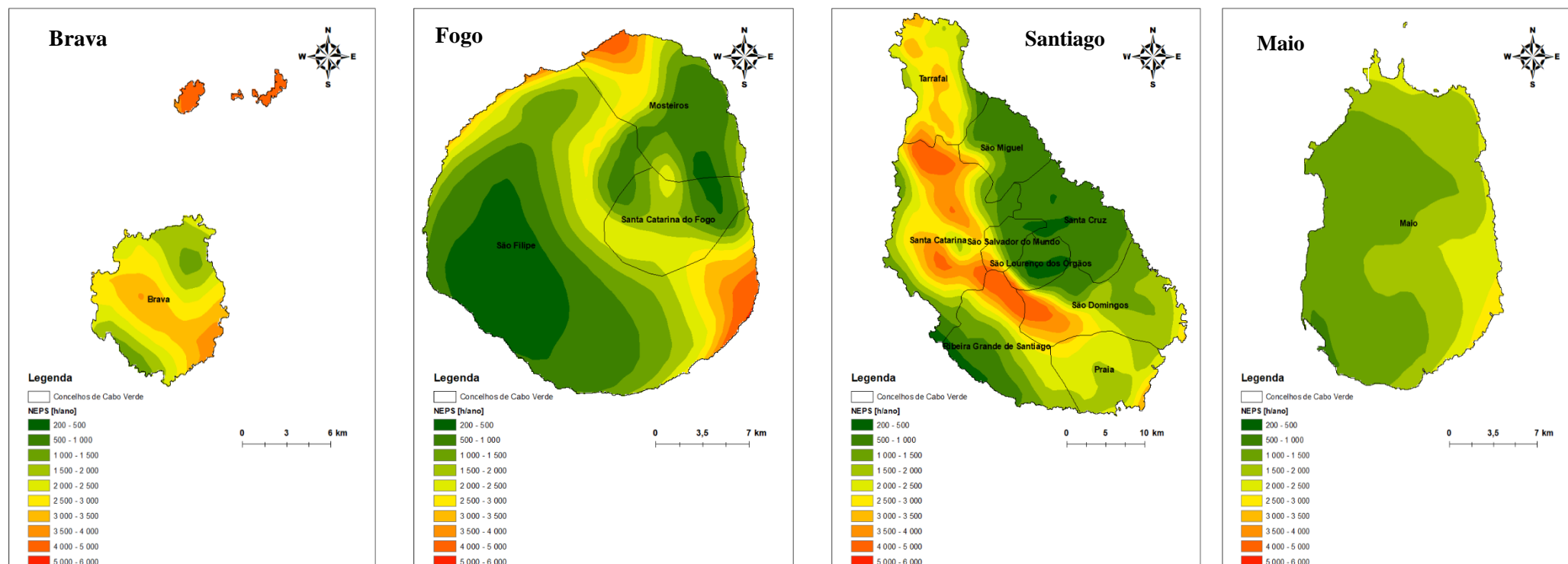


Figura 5.6 – Distribuição espacial do número de horas equivalentes a potência nominal (NEPs) para a turbina eólica Vestas V52 de 850 kW (h = 52m).

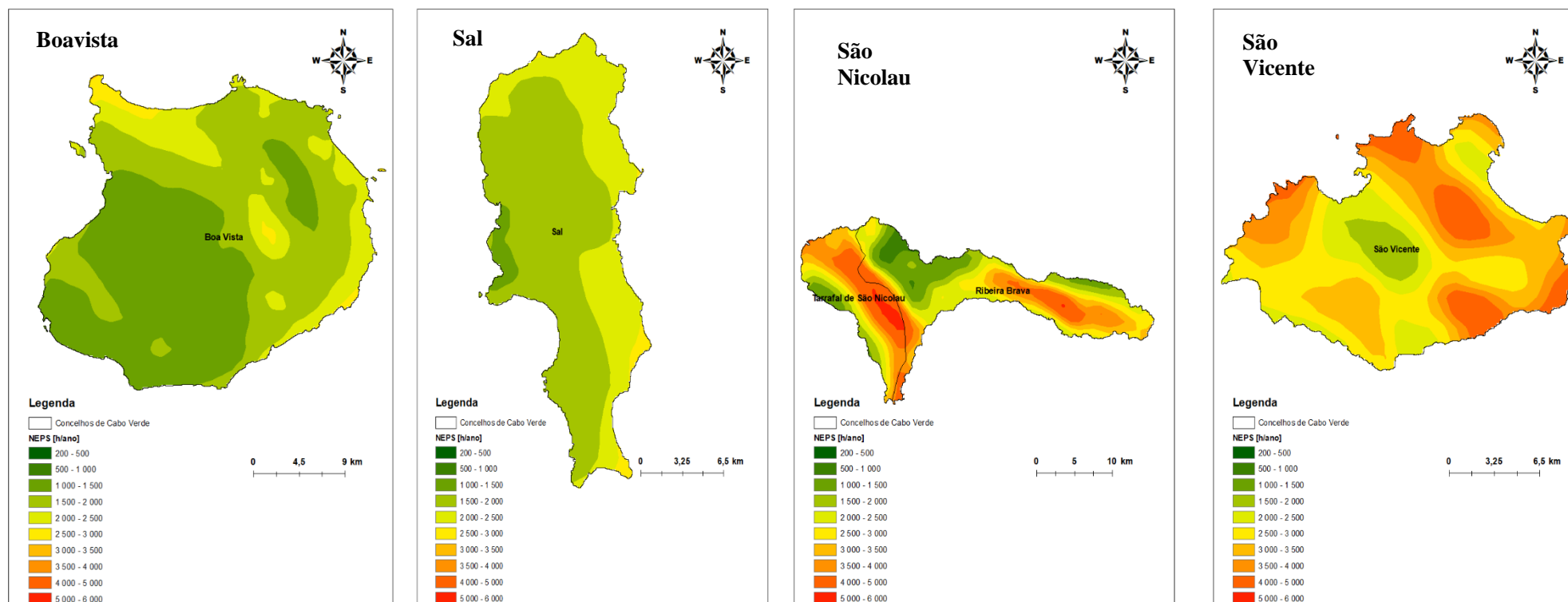


Figura 5.6 – Distribuição espacial do número de horas equivalentes a potência nominal (NEPS) para a turbina eólica Vestas V52 de 850 kW ($h = 52m$) - (Continuação).

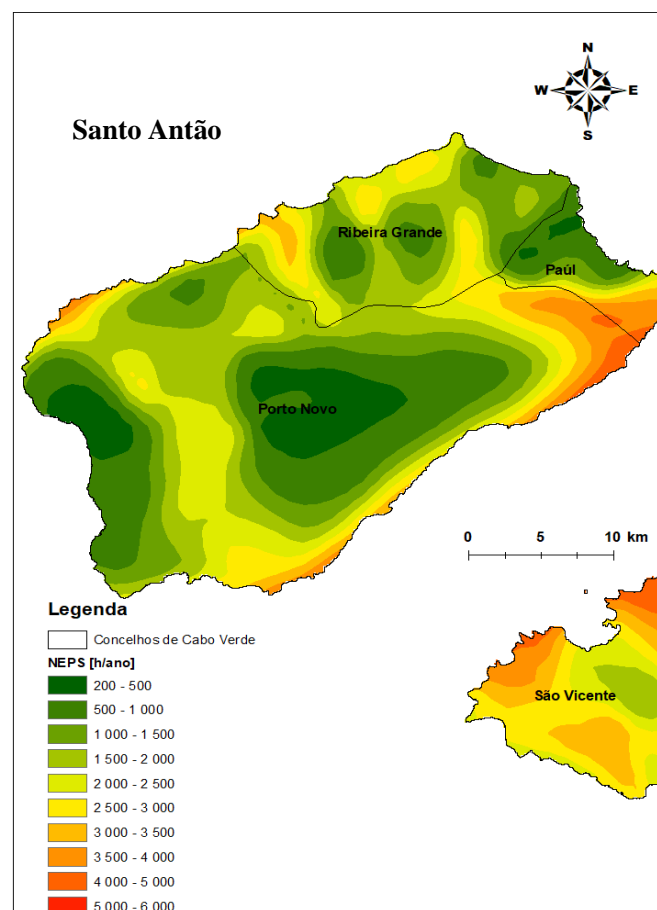


Figura 5.6 – Distribuição espacial do número de horas equivalentes a potência nominal (NEPs) para a turbina eólica Vestas V52 de 850 kW (h = 52m) - (Continuação).

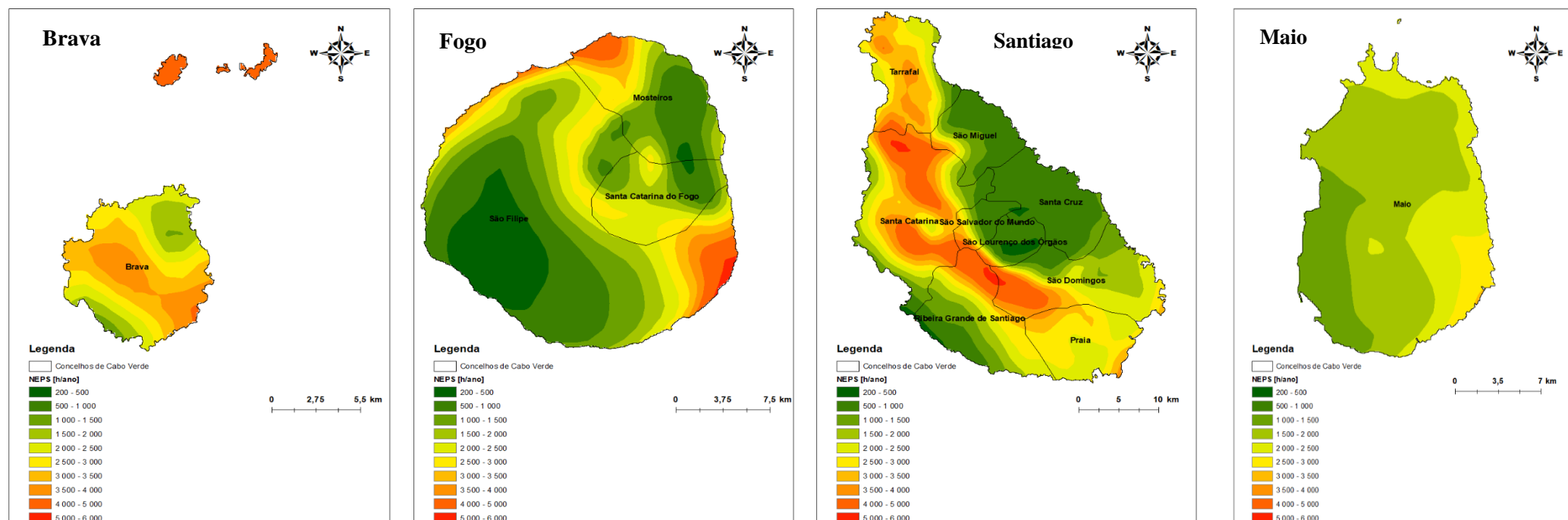


Figura 5.7 – Distribuição espacial do número de horas equivalentes a potência nominal (NEPs) para a turbina eólica Vestas V80 de 2000 kW (h = 80m).

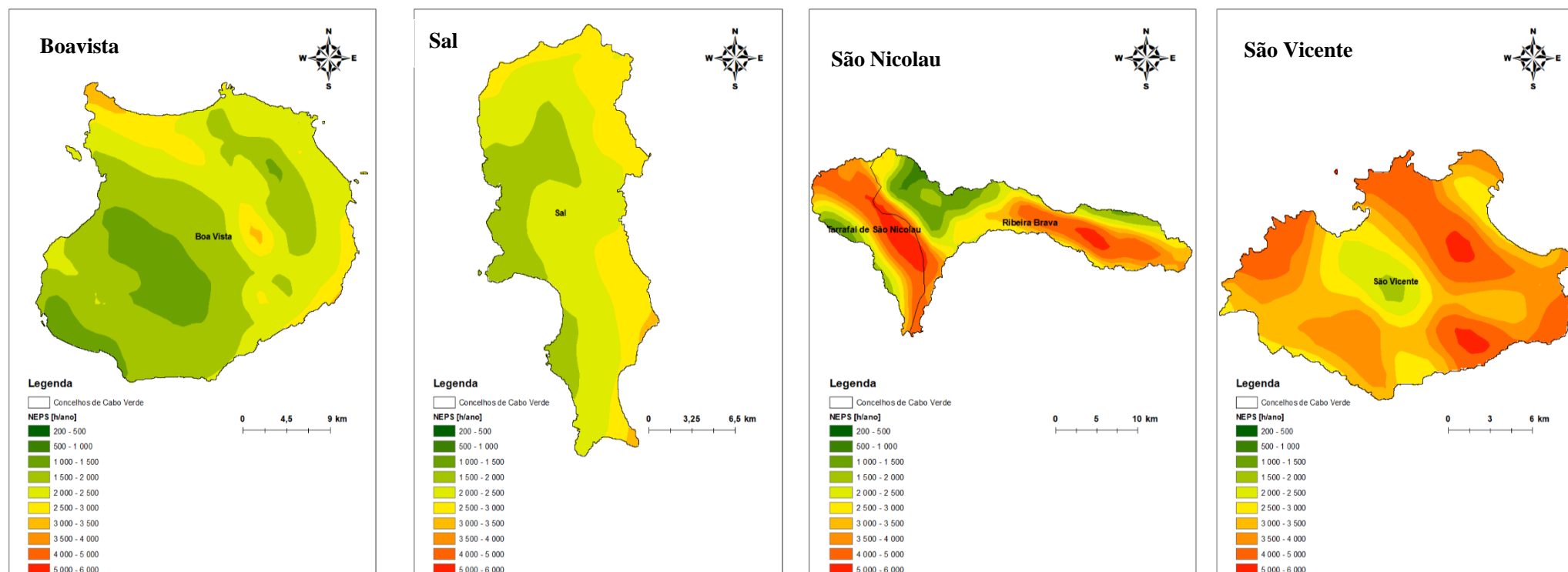


Figura 5.7 – Distribuição espacial do número de horas equivalentes a potência nominal (NEPs) para a turbina eólica Vestas V80 de 2000 kW ($h = 80m$) - (Continuação).

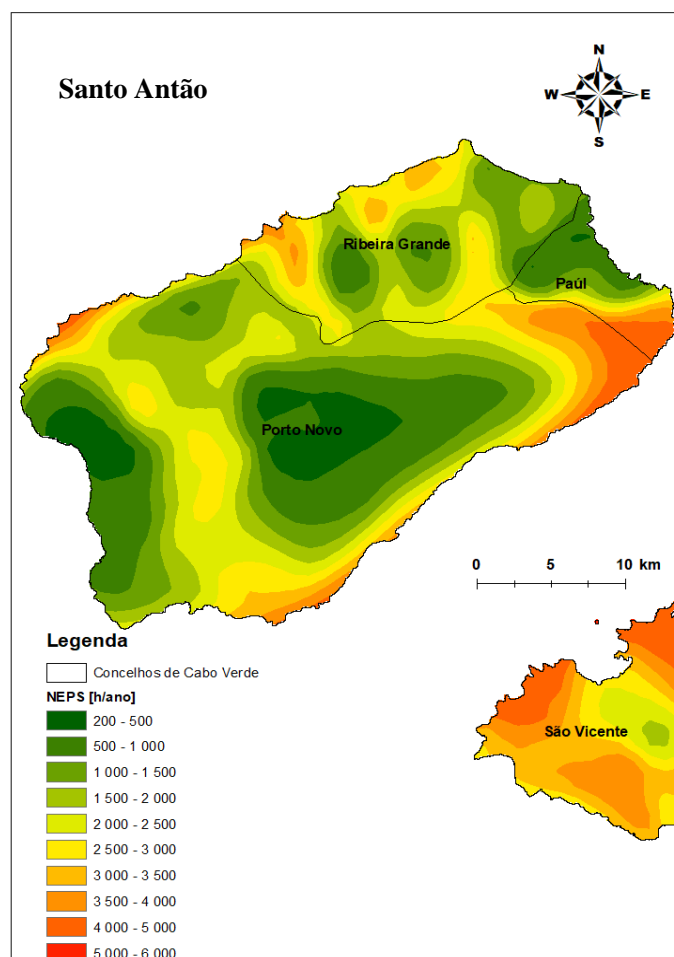


Figura 5.7 – Distribuição espacial do número de horas equivalentes a potência nominal (NEPs) para a turbina eólica Vestas V80 de 2000 kW (h = 80m) - (Continuação).

5.2. Estimativa do Potencial Sustentável

Para estimar o potencial sustentável existente em Cabo Verde, partiu-se do mapa do NEPs, onde se impôs a condição do mínimo de rentabilidade de um parque eólico, *i.e.*, pontos da grelha que apresentem NEPs inferiores a 2000 h/ano são excluídos. Assim, os mapeamentos do potencial eólico sustentável apresentados nesta secção resultam da interseção no ArcGIS das áreas correspondentes ao declive do terreno inferior a 25 %, NEPs superior ou igual a 2000 hora/ano e da exclusão das áreas protegidas, das áreas ocupadas pelos parques eólicos existentes e da área ocupada pela rede rodoviária.

5.2.1. Mapeamento do potencial eólico sustentável

Nas Figura 5.8 e Figura 5.9 apresentam-se os mapeamentos do parâmetro NEPs para os modelos de turbina eólica Vestas V52 de 850kW e Vestas V80 de 2000kW, respetivamente, após aplicação das zonas de exclusão anteriormente descritas.

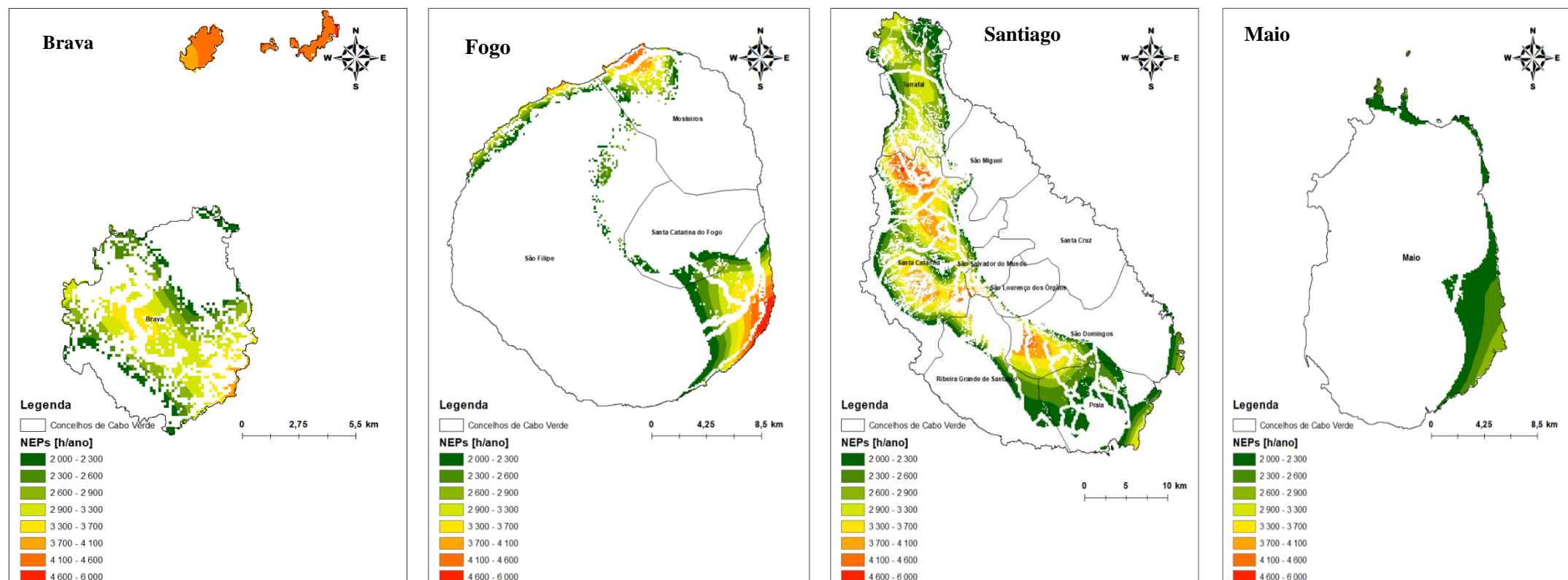


Figura 5.8 – NEPs para a turbina eólica Vestas V52 de 850 kW a uma altura de 52 metros após intersecção das condicionantes.

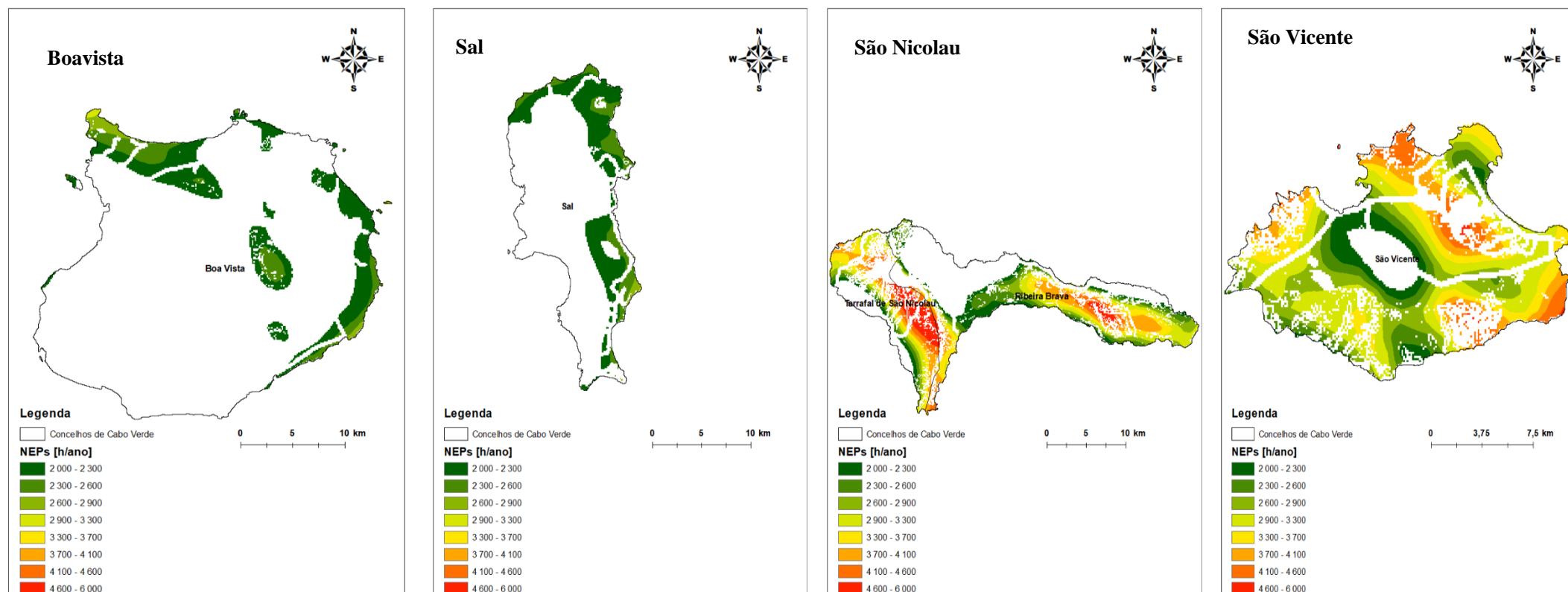


Figura 5.8 – Número de horas equivalentes à potência nominal, NEPs, para a turbina eólica Vestas V52 de 850 kW a uma altura de 52 metros (Continuação).

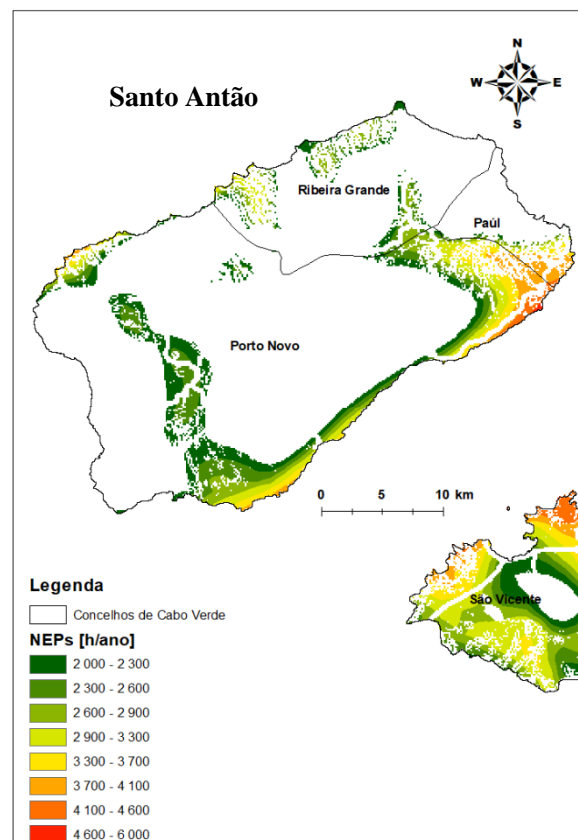


Figura 5.8 – Número de horas equivalentes à potência nominal, NEPs, para a turbina eólica Vestas V52 de 850 kW a uma altura de 52 metros (Continuação).

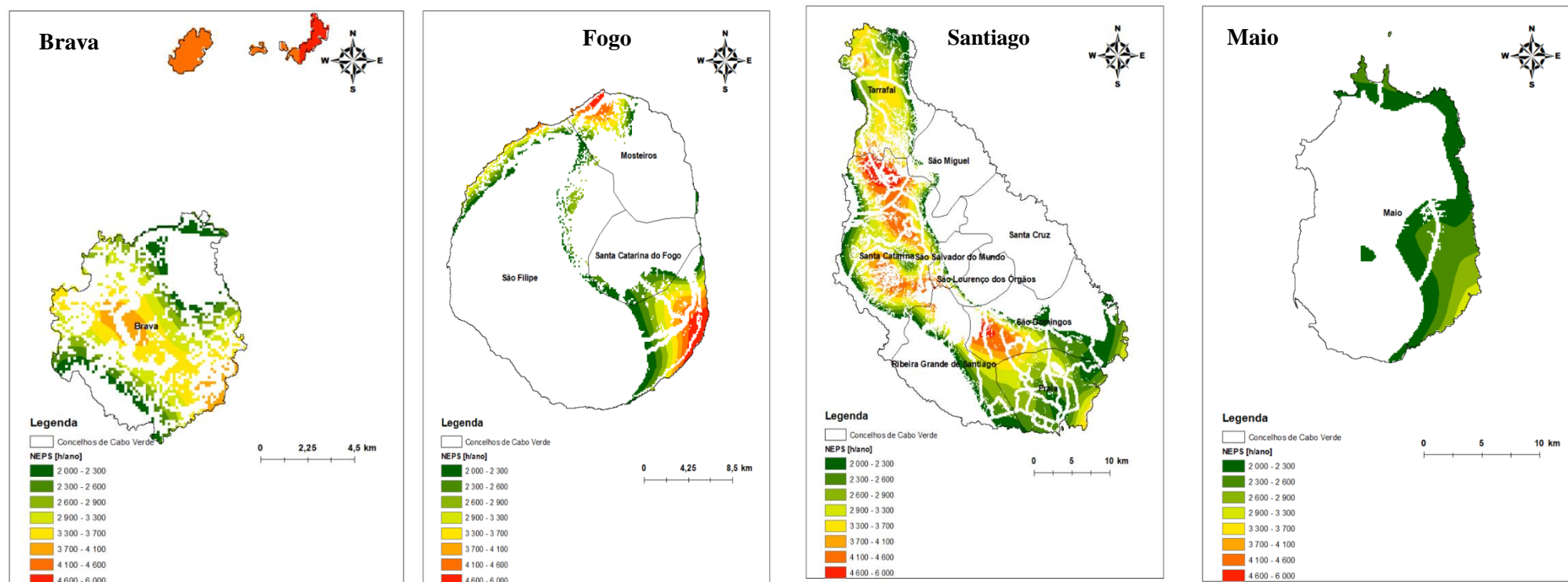


Figura 5.9 – Número de horas equivalentes à potência nominal, NEPs, para a turbina eólica Vestas V80 de 2000 kW a uma altura de 80 metros.

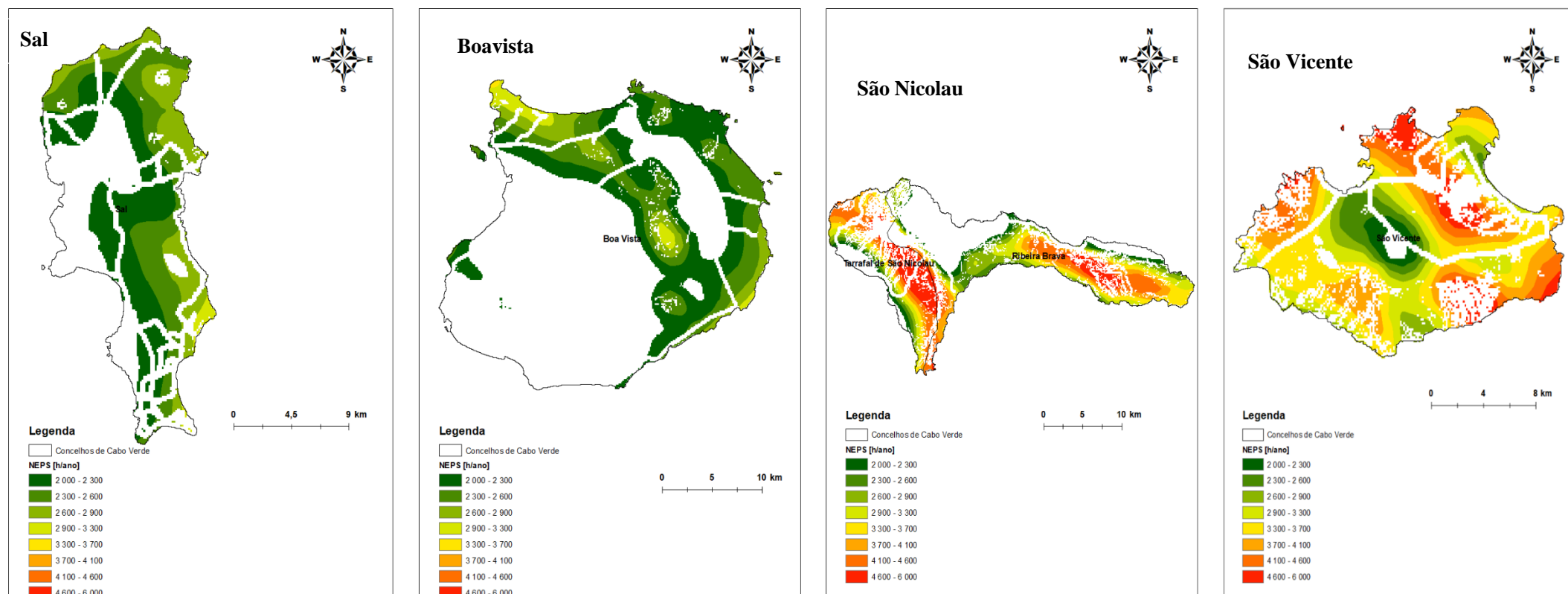


Figura 5.9 – Número de horas equivalentes à potência nominal, NEPS, para a turbina eólica Vestas V80 de 2000 kW a uma altura de 80 metros (Continuação).

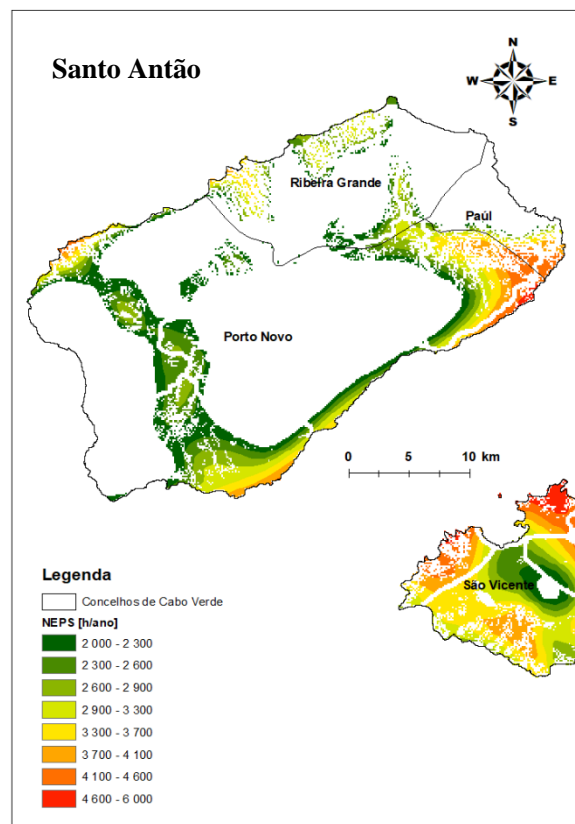


Figura 5.9 – Número de horas equivalentes à potência nominal, NEPs, para a turbina eólica Vestas V80 de 2000 kW a uma altura de 52 metros (Continuação).

É de referir que as ilhas do Sal, Boavista e Maio por serem ilhas planas com poucas variações de relevo – diminuição dos efeitos de concentração no escoamento atmosférico – apresentam poucas áreas com NEPs igual ou superior a 2000 horas por ano, quando comparadas com as ilhas de São Nicolau e de Santiago, por exemplo, onde o terreno é montanhoso e de declives moderados.

Como expectável, no mapa de NEPs, a área ótima disponível para o aproveitamento eólico aos 80 metros é superior à área disponível aos 52 metros. Isto porque a velocidade média do vento aos 80 metros é superior à velocidade média aos 52 metros, e, consequentemente, as zonas adequadas para a exploração de energia eólica é superior.

Os mapas de NEPs obtidos para as alturas de 52 e 80 metros, possuem informações essenciais onde os eventuais promotores de energia eólica podem consultar, não só, o recurso eólico existente em número de horas equivalentes à potência nominal das duas turbinas estudadas, mas também os locais em cada ilha/zona administrativa onde se verificam condições ambientais e de terreno, favoráveis para a instalação de parques eólicos. De forma a completar esta informação, seguidamente, apresenta-se o potencial eólico sustentável para exploração em cada zona administrativa do país.

5.2.2. Cálculo do potencial sustentável para cada zona administrativa do país

5.2.2.1. Resultados para a turbina eólica Vestas V52 de 850 kW

O cálculo do potencial sustentável para cada zona administrativa do país foi feita através da aplicação da expressão 4.5. Na Tabela 17 encontram-se os valores dos parâmetros utilizados na estimativa do potencial sustentável para a turbina Vestas V52 850 kW, onde se considerou que *i*) existem 5% de perdas equivalentes de energia (o que resulta num EL (coeficiente de perdas equivalentes de energia potencial), de 0,95) e *ii*) a distância mínima inter-turbina é de 5 diâmetros na direção *x* e de 5 vezes o diâmetro na direção *y* (distâncias estas consideradas suficientes para reduzir o efeito de esteira inter-turbinas).

Tabela 17 – Valores dos parâmetros assumidos no cálculo do potencial eólico sustentável para a turbina eólica Vestas V52 de 850 kW (altura de 52 metros).

Parâmetros	Valores
EL	0,95
Pot	0.85 MW
$\delta_x = \delta_y$	5
D	52 m

Na Tabela 18 apresenta-se o Potencial Eólico Sustentável, utilizando a turbina eólica Vestas V52 de 850 kW de potência nominal, para as diferentes zonas administrativas de Cabo Verde. Na Figura 5.10 representa-se o potencial eólico sustentável por cada ilha.

Tabela 18 – Potencial eólico sustentável para cada zona administrativa de Cabo Verde - Vestas V52 de 850 kW.

Ilha	Concelho	P (MW)
Boa Vista	Boa Vista	283
Brava	Brava	115
Maio	Maio	104
São Vicente	São Vicente	686
Sal	Sal	189
Santo Antão	Paúl	27
	Porto Novo	407
	Ribeira Grande	56
São Nicolau	Tarrafal de São Nicolau	286
	Ribeira Brava	470
Fogo	Mosteiros	41
	São Filipe	159
	Santa Catarina	17
Santiago	Praia	160
	Ribeira Grande	76
	São Domingos	149
	São Lourenço dos Órgãos	2
	São Miguel	2
	São Salvador do Mundo	12
	Santa Catarina	381
	Tarrafal	247

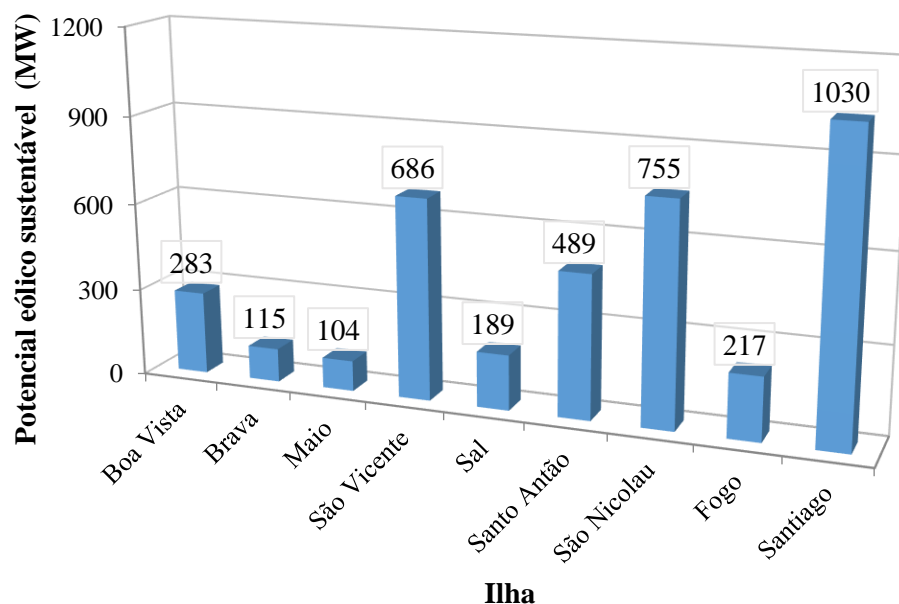


Figura 5.10 – Potencial eólico sustentável disponível para cada ilha - turbina eólica Vestas V52 de 850 kW.

Através da análise da Tabela 18, constata-se que em termos das zonas administrativas para a turbina eólica Vestas V52 de 850 kW, grande parte dos concelhos possuem um elevado potencial inexplorado de energia eólica (superior a 100 MW). Desta forma e tendo em conta que, em todo o arquipélago de Cabo Verde a potência eólica instalada é de apenas 30,6 MW, produzindo 19 % de toda a energia elétrica consumida no país, pode-se afirmar que Cabo Verde possui excelentes condições para aumentar a taxa de penetração desta fonte renovável permitindo a descarbonização do sistema electroprodutor.

5.2.2.2. Resultados para a turbina eólica Vestas V80 de 2000 kW

Nesta subsecção apresenta-se o cálculo do potencial eólico sustentável utilizando a turbina eólica Vestas V80 de 2000 kW, considerando os parâmetros presentes na Tabela 19 e aplicando a expressão 4.5. Na Tabela 20 apresentam-se os resultados correspondentes ao potencial eólico sustentável disponível para as diferentes zonas administrativas do arquipélago de Cabo Verde. Na Figura 5.11 é possível visualizar o potencial eólico sustentável por cada ilha.

Tabela 19 – Valores dos parâmetros assumidos no cálculo do potencial eólico sustentável para a turbina eólica Vestas V80 de 2000 kW (para uma altura de 80 metros).

Parâmetros	Valores
EL	0,95
Pot	2 MW
$\delta_x = \delta_y$	5
D	80 m

Tabela 20 – Potencial eólico sustentável para cada zona administrativa de Cabo Verde - turbina eólica Vestas V80 de 2000 kW.

Ilha	Concelho	P (MW)
Boa Vista	Boa Vista	780
Brava	Brava	132
Maio	Maio	232
São Vicente	São Vicente	803
Sal	Sal	427
Santo Antão	Paúl	31
	Porto Novo	524
	Ribeira Grande	75
São Nicolau	Tarrafal de São Nicolau	325
	Ribeira Brava	550
Fogo	Mosteiros	45
	São Filipe	159
	Santa Catarina	25
Santiago	Praia	273
	Ribeira Grande	128
	São Domingos	248
	São Lourenço dos Órgãos	3
	São Miguel	4
	São Salvador do Mundo	14
	Santa Catarina	456
	Tarrafal	247

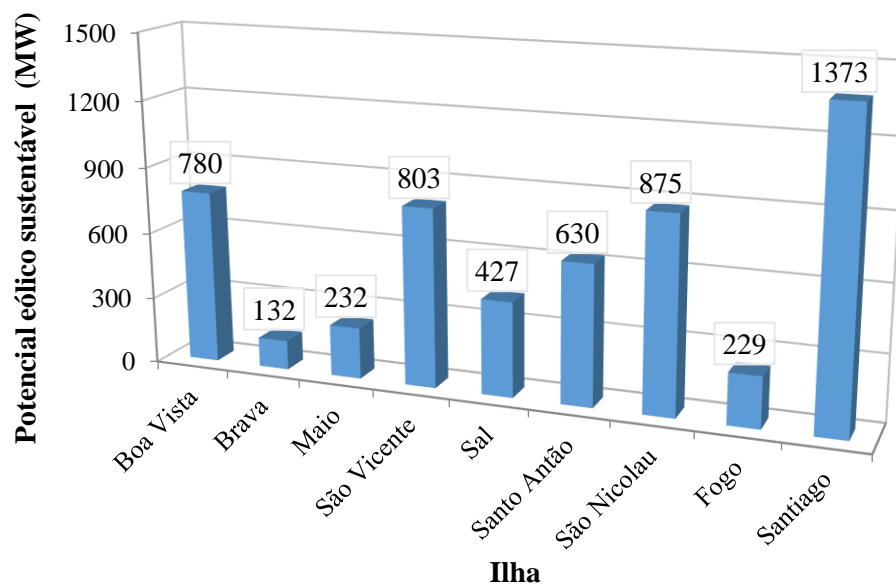


Figura 5.11 – Potencial eólico sustentável disponível para cada ilha - turbina eólica Vestas V80 de 2000 kW.

Como esperado após análise dos resultados obtidos para a turbina eólica Vestas V52, verifica-se que existe um elevado potencial eólico inexplorado no arquipélago, o que vem reforçar a estratégia do desenvolvimento do país baseado nos recursos renováveis, onde a energia eólica se destaca não só pelo potencial existente, mas também, como verificado no Atlas, pelo facto de a direção dominante

do escoamento ser predominantemente de um sector bem definido, ou seja, predominantemente de Nordeste. Esta característica da direção do escoamento é particularmente relevante na definição da localização das turbinas eólicas nos futuros parque eólicos a instalar no arquipélago.

5.2.3. Síntese dos resultados obtidos

Nesta secção apresenta-se um resumo dos resultados do potencial sustentável estimado para todas as ilhas de Cabo Verde tendo em consideração os dois modelos de turbina eólica analisados neste trabalho (Figura 5.12). Nesta figura é ainda possível visualizar a potência eólica atualmente definida para cada ilha nas Zonas de Desenvolvimento de Energias Renováveis (ZDER).

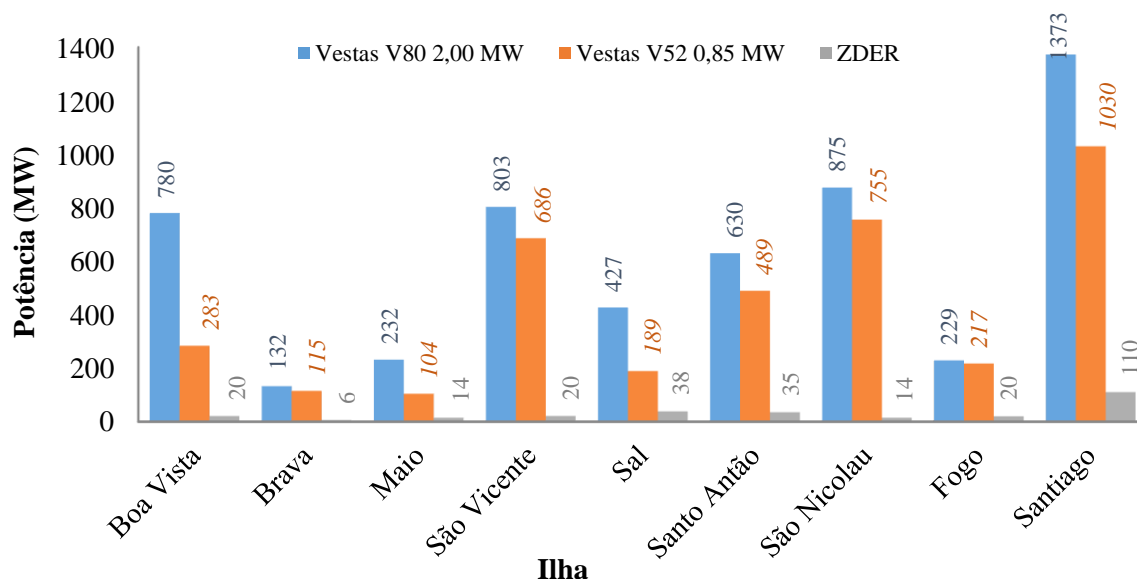


Figura 5.12 - Potencial eólico sustentável estimado através das turbinas eólicas Vestas V52 de 850 kW e Vestas V80 de 2000 kW e a potência disponível definidas nas ZDER.

Como seria de esperar, o potencial eólico sustentável estimado com base no modelo de turbina Vestas V80 de 2000 kW é superior ao potencial estimado utilizando a turbina Vestas V52 de 850 kW (mais do dobro no caso das ilhas de Boa Vista, Maio e Sal). A ilha de Santiago apresenta os valores mais elevados de potencial eólico disponível para exploração. Por outro lado, a ilha de Maio é a que apresenta menor potencial eólico disponível para a exploração. Sendo a ilha de Santiago a mais povoada (Figura 4.8), é a ilha com a maior procura de energia do país, pelo que a exploração do elevado potencial eólico disponível é uma excelente opção para suprir o consumo de energia elétrica da ilha.

Existe uma grande diferença entre o potencial disponível para a exploração definido nas ZDER e o potencial eólico sustentável estimado nesta dissertação (Figura 5.12). De facto, em todas as ilhas, o potencial estimado através das duas turbinas é superior ao identificado nas ZDER. Deste modo, conclui-se que existe um elevado potencial eólico a explorar no país.

6. Conclusões e desenvolvimentos futuros

Neste estudo, é apresentada uma metodologia para a identificação do recurso eólico e estimativa do potencial eólico sustentável para Cabo Verde. A metodologia aplicada abrange todo o território do arquipélago de Cabo Verde, dividido pelas zonas administrativas, recorrendo a um modelo de mesoescala com elevada discretização, o MM5 (modelo numérico de mesoescala de quinta geração) espacial - 1x1 km - por forma a reduzir a incerteza associada à produção anual de energia e os riscos associados ao financiamento de futuros projetos. Posteriormente o resultado obtido da aplicação do modelo numérico MM5 é introduzido no SIG para aplicação da metodologia da identificação do potencial sustentável para o arquipélago de Cabo Verde.

O Atlas do vento desenvolvido possui uma resolução de 1x1 km, pelo que se considera que esta resolução é suficientemente fina para simular o escoamento atmosférico local, para efeitos de planeamento da instalação de turbinas eólicas, em terrenos complexos. Através da análise climatológica feita, verificou-se que os anos simulados se encontram perto da média de longo termo observada nos últimos 20 anos. No que diz respeito a validação do Atlas do potencial eólico, os resultados obtidos para a intensidade e direção do vento revelam que a metodologia utilizada é adequada para a avaliação do recurso eólico para o arquipélago Cabo Verde. Os desvios das velocidades médias para as estações meteorológicas GVAC e GVNP são inferiores a 30%, mais especificamente, desvios médios globais de +1,11 m/s (23%), 1,02 m/s (20%) e para a estação meteorológica GVSV um desvio de 2,22 m/s (37%) (Tabela 14). Os valores das correlações entre as velocidades médias mensais simuladas e observadas são superiores a 80%, verificando valores de 81%, 85% e 82% correspondentes às estações meteorológicas GVAC, GVNP e GVSV, o que mostra a elevada semelhança existente entre a variabilidade mensal dos dados observados e simulados, a 10 metros de altura.

As direções médias observadas e simuladas apresentam desvios reduzidos. As direções médias do escoamento simuladas apresentam valores inferiores às direções médias observadas nas estações meteorológicas, verificando diferenças globais (calculadas com base nos desvios entre os registos e valores simulados horários) de 23,49°, 29,30° e 20,91° nas estações meteorológicas GVAC, GVNP e GVSV, respetivamente. Assim, conclui-se que as estimativas da intensidade e direção do escoamento obtidas pelo modelo numérico MM5 são representativas do escoamento verificado no arquipélago de Cabo Verde, uma vez que *i)* os desvios verificados da intensidade do vento e direção são reduzidos e *ii)* existe uma elevada correlação entre os dados observados e simulados da velocidade do vento.

De acordo com os resultados obtidos para os campos médios da intensidade do vento, conclui-se que Cabo Verde possui excelentes condições para o aproveitamento eólico. Através dos dados observados foi possível verificar que a velocidade média do vento aos 10 metros de altura é superior a 5 m/s nas estações meteorológicas analisadas (GVAC, GVNP e GVSV). Outra característica relevante do escoamento atmosférico na região encontra-se relacionada com a direção predominante do vento. A direção do escoamento simulado (e observado nas estações na região) é predominantemente de NE, ou seja, a direção do vento é de NE em cerca de 90% do ano em quase todo o território de Cabo Verde. Em relação aos mapas gerados para as alturas de 52 e 80 metros (altura do eixo do rotor das turbinas eólicas analisadas nesta dissertação), a velocidade média do vento para o arquipélago chega, em algumas zonas do país, a ser superior a 10 m/s.

O potencial eólico sustentável para o arquipélago de Cabo Verde estimado resulta da análise de informações do recurso eólico, o Atlas do vento, dos condicionantes ambientais, de terreno e uso de solo utilizando uma ferramenta SIG, *software* ArcGIS. A recolha das informações de terreno, das

zonas protegidas e da rede rodoviária baseou-se maioritariamente nas informações publicamente disponíveis para a área de estudo

Cabo Verde conta com 3,9 GW de potencial eólico disponível para exploração, no caso de se instalar uma turbina eólica do tipo Vestas V52 de 850 kW de potência nominal. Esta potência disponível é mais de 100 vezes superior à potência instalada atualmente no país. Quanto ao estudo efetuado para a turbina do tipo Vestas V80 de 2 MW de potência nominal, contabiliza-se um valor de aproximadamente 5,5 GW de potência disponível para a exploração em todo o arquipélago. Desta forma, denota-se que a escolha da turbina eólica possui um enorme impacto na exploração do potencial existente em cada zona administrativa.

Os indicadores energéticos identificados neste trabalho são significativamente superiores aos identificados no Plano Energético Renovável de Cabo Verde (PERCV), evidenciando que é possível definir cenários mais otimistas para a descarbonização do sistema elétrico em Cabo Verde, mitigando alguns dos impactos negativos associados a elevada penetração de fontes de energia convencionais. Salienta-se, no entanto, o facto de não ter sido considerada neste estudo, a capacidade de receção da rede elétrica para a energia gerada com base na capacidade eólico identificada. Ainda assim, os resultados deste trabalho permitem obter indicadores energéticos de auxílio, não só à decisão no planeamento de novas redes elétricas e infraestruturas, mas também, aos investimentos em campanhas experimentais de promotores de parques eólicos e demais investidores.

6.1. Desenvolvimentos futuros

Face aos resultados obtidos e aos desvios observados na validação do Atlas do vento, considera-se poder melhorar as estimativas obtidas nesta dissertação através de uma conjugação de modelos de mesoescala e de microescala. Este processo encadeado pode permitir uma melhor caracterização de fenómenos locais, aumentando assim a precisão dos resultados obtidos. Os modelos de microescala são capazes de lidar com orografia de alta resolução espacial e desta forma, estimar com maior rigor os efeitos de concentração do vento em terrenos complexos. Adicionalmente, recorrendo a estes modelos, espera-se também, entrar em conta com a influência da rugosidade/obstáculos com maior discretização na região de simulação.

Uma vez que o Atlas construído se baseou em apenas dois anos de dados, os indicadores do potencial eólico sustentável obtidos devem ser confirmados recorrendo a um período estatisticamente significativo de forma a reduzir as incertezas, minimizando o risco num possível investimento.

No processo inerente ao cálculo do potencial eólico sustentável, considera-se que existem algumas melhorias a ser feitas, tais como: a melhoria dos mapas das zonas protegidas e classificadas em todo o território do arquipélago de Cabo Verde; a introdução do mapa da rede elétrica do país tendo em conta que a rede elétrica e as suas características (*e.g.*, localização e capacidade das linhas) constituem fatores essenciais para o aproveitamento eólico em algumas regiões.

7. Referências Bibliográficas

- [1] OECD/IEA e IRENA, «Perspectives for the Energy Transition: Investment Needs for a Low-Carbon Energy System», *Rel. Tec. International Energy Agency*, p. 204, 2017.
- [2] Gesto Energy - Energy Solutions e Governo de Cabo Verde, «Atlas e projectos de Energias renováveis de Cabo Verde», *Rel. Tec. Gesto Energy*, Praia, Cabo Verde, p. 448, 2011.
- [3] S. Hermann, A. Miketa, e N. Fichaux, «Estimating the Renewable Energy Potential in Africa GIS-based approach», *Rel. Tec. IRENA/KTH Project Agreement*, p. 73, 2014.
- [4] A. Estanqueiro, «Turbinas Eólicas Princípio de funcionamento», *Apontamentos de Energia Eólica: Princípio de funcionamento de turbinas eólicas parte I, Aerodinâmica e transmissão*, Lisboa, Portugal, p. 55, 2011.
- [5] IRENA -International renewable energy agency, «The Socio-economic Benefits of Solar and Wind Energy», pp. 1–108, 2014.
- [6] A. Estanqueiro, «Integração de centrais eólicas na rede eléctrica Normas e Recomendações», pp. 2–22, 2011.
- [7] J. Pedro e A. Couto, «Integração dos Projectos Eólicos com a Envolvente», em *Engenharias 2007- Inovação & Desenvolvimento*, 2007, p. 5.
- [8] I. Michael Taylor (IRENA); Kathleen Daniel (IRENA); Andrei Ilas (IRENA) and Eun Young So (IRENA), «Renewable Power Generation Costs in 2014 : An Overview», 2015.
- [9] INE Cabo Verde, «Apresentação de dados preliminares do IVº RGPH 2010:Gabinete do Censo 2010», Praia, Cabo Verde, 2010.
- [10] Governo de Cabo Verde, «República de Cabo Verde. Consulado-Geral na Holanda. Informações gerais», 2017. Disponível em: <http://www.conscv.nl/pt/cabo-verde/informacoes-gerais-sobre-cabo-verde>. [Acedido: 18-Out-2017].
- [11] ELECTRA, «Relatório de contas-Exercício de 2015», *Rel. Tec. ELECTRA – EMPRESA DE ELETRICIDADE E ÁGUA SARL*, Praia, Cabo Verde, p. 52, 2015.
- [12] Gesto Energy Solutions, «New framework for procurement of RE IPP projects in Cabo Verde/ Novo modelo de lançamento de concursos para projectos IPP renováveis em Cabo Verde», Praia, Cabo Verde, 2016.
- [13] Gesto Energy Solutions, «Plano Estratégico Para As Energias Renováveis de Cabo Verde», *Rel. Tec. Gesto Energy*, Algés, Portugal, p. 33, 2011.
- [14] Gesto Energy Solutions, «Plano Energético Renovável de Cabo Verde», Algés, Portugal, 2011.
- [15] J. V. Lopes, *Cabo Verde*. Bissau, Guiné-Bissau: Revistas dos estudos Guineenses, 2002.
- [16] ECREEE, ITC, Á. Casa, e Gobierno de Canarias, *Energias renováveis na África Ocidental - Estado, Esperências e Tendências*. 2012.
- [17] IRENA, *A Path to Prosperity: Renewable Energy for Islands, 3rd Edition*. Abu Dhabi: IRENA, 2016.
- [18] Renováveis.Tecnopt.com, «Como funciona um aerogerador». pp. 1–10, 1998.
- [19] G. Georg a, J. Dudhia, e D. R. Stauffer, «A description of the Fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)», *NCAR Tech. Note NCAR/TN-398+STR*, pp. 1–128, 1994.
- [20] S. Tummuri, «Methodology of regional climate studies for West Texas and its importance», p. 289, 2008.
- [21] B. Jake e Neil Davis et All, «The Global Wind Atlas : The New Worldwide Microscale Wind Resource Assessment Data and Tools Open access to global wind atlas data Use the data and extend its application Invite feedback and new ideas», 2015.

- [22] Service/NOAA/U.S.National Centers for Environmental Prediction/National Weather. World Climate Research Programme. Global Climate Observing System Working Group on Surface Pressure, «Advancing Reanalysis», 2018. Disponível em: <http://reanalyses.org/atmosphere/overview-current-atmospheric-reanalyses>. [Acedido: 04-Fev-2018].
- [23] DTU Wind Energy (Departament of Wind Energy), «The Global Wind Atlas», Roskilde Denmark, 2017.
- [24] DTU Wind Energy e WorldBankGroup, «Global Wind Atlas», 2018. .
- [25] E. C. for M.-R. W. Forecasts, «ERA-Interim Project, Single Parameter 6-Hourly Surface Analysis and Surface Forecast Time Series. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory», 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5065/D64747WN>. [Acedido: 08-Fev-2017].
- [26] Gesto Energy. Energy Solutions, «Plano Energético Renovável. Cabo Verde. Estudo do recurso eólico», pp. 55–118, 2012.
- [27] F. A. S. Dias, «Uma Aplicação Webgis Para a Participação Pública No Âmbito Do Projeto Margov», *Tese de mestrado*, Lisboa, Portugal, p. 182, 2010.
- [28] P. Costa, T. Simões, e A. Estanqueiro, «Sustainable Offshore Wind Potential in Continental Portugal», *Work. Ocean. as a Source Energy*, pp. 40–43, 2010.
- [29] T. Simões, P. Costa, e A. Estanqueiro, «A methodology for the identification of the sustainable wind potential. The Portuguese case study», *2009 IEEE/PES Power Syst. Conf. Expo. PSCE 2009*, pp. 1–7, 2009.
- [30] J. A. Clarke e A. D. Grant, «Planning support tools for the integration of renewable energy at the regional level», *Renew. Energy*, vol. 9, n. 1–4, pp. 1090–1093, Set. 1996.
- [31] M. Abbaspour e R. Rahimi, «Iran atlas of offshore renewable energies», *Renew. Energy*, vol. 36, n. 1, pp. 388–398, Jan. 2011.
- [32] J. Hossain e D. Sharma, «Report on India’s Wind Power Potential», Delhi, Índia, 2015.
- [33] J. Domínguez e J. Amador, «Geographical information systems applied in the field of renewable energy sources», *Comput. Ind. Eng.*, vol. 52, n. 3, pp. 322–326, Abr. 2007.
- [34] C. Goodman, «Community Wind Site Suggestions in Eastern Massachusetts», em *poster GIS 101*, 2015, p. 1.
- [35] C. D. Ahrens, *Essentials of meteorology: an introduction to Weather, Climate, and the Environment*, 9th Editio. Belmont, USA, 2008.
- [36] A. O. Persson, «Hadley’s Principle: Understanding and Misunderstanding the Trade Winds», *Hist. Meteorol.*, vol. 3, pp. 17–42, 2006.
- [37] P. M. A. Miranda *et al.*, «Curso de Introdução à Meteorologia», Lisboa, Portugal, 2012.
- [38] C. DONALD e AHRENS, *Essentials of Meteorology, An Inovation to the Atmosphere*, 3rd editio. Belmont, USA, 2000.
- [39] IPMA, «IPMA - Índice», 2017. Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/otempo/previsao.numerica/index.html?page=aladin.bri sa.monta.xml>. [Acedido: 28-Jan-2017].
- [40] A. I. Estanqueiro, «Modelação Dinâmica de Parques Eólicos», Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1997.
- [41] E. Simiu e R. H. Scarlan, *Wind effects on structures.*, 2nd Editio. Wiley-Interscience, 1986.
- [42] J. G. Saraiva, «Ensaio de um aerogerador. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório LNEC - proc.36/1/7206», *Rel. Tec. LNEG*, Lisboa, Portugal, p. 16, 1983.
- [43] J. G. Saraiva, «Aerodinâmica dos Edifícios Altos. Tese de Especialista, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.», *Rel. Tec. LNEG*, Lisboa, p. 261, 1983.

- [44] A. G. DAVENPORT, «THE TREATMENT OF WIND LOADING ON TALL BUILDINGS», em *Tall Buildings*, A. C. and B. S. Smith, Ed. Elsevier, 1967, pp. 3–45.
- [45] C. Casadinho, «Base de Dados do Potencial Eólico em Portugal Continental», *Tese de mestrado*, Lisboa, Portugal, p. 133, 2014.
- [46] J. F. Manwell, J. G. McGowan, e Rogers, *Wind Energy Explained*. Estados Unidos da América, 2002.
- [47] T. Simões Esteves, «Base de Dados do Potencial energético do Vento em Portugal – Metodologia e Desenvolvimento», *Tese de mestrado em Ciências e Engenharia da Terra, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*, Lisboa, Portugal, p. 107, 2004.
- [48] H. L. Wegley, J. V Ramsdell, e R. L. Drake, «A Siting Handbook for Small Wind Energy Conversion Systems Harry», Washington, USA, 1980.
- [49] A. Estanqueiro e T. Simões, «Seleccção de Locais». Lisboa, Portugal, p. 53, 2011.
- [50] S. Roland, «The Atmospheric Boundary Layer», em *Atmospheric Science*, Elsevier, 2006, pp. 375–417.
- [51] R. Ramalho, G. Helffrich, D. N. Schmidt, e D. Vance, «Tracers of uplift and subsidence in the Cape Verde archipelago», *J. Geol. Soc. London.*, vol. 167, n. 3, pp. 519–538, Mai. 2010.
- [52] A. Ilídio, *Santiago de Cabo Verde: A Terra e os Homens, Memórias da Junta de Investigação do Ultramar*. Lisboa, Portugal: Memórias da Junta de Investigação do Ultramar / Junta de Investigações do Ultramar, 1964.
- [53] A. J. da S. Teixeira e L. A. G. Barbosa, *A agricultura do arquipélago de Cabo Verde. Cartas agrícolas. Problemas agrários*, 2ª Série. 1958.
- [54] I. Troen e E. L. Peterson, *EUROPEAN WIND ATLAS*. Roskilde, Denmark, 1989.
- [55] D. Randall, «An Introduction to Atmospheric Modeling», *Apointamentos AT604 Department of Atmospheric Science Colorado State University*, Colorado, USA, p. 362, 2004.
- [56] P. C. e A. E. U. António Couto, «Formação de Mesoscala: - Fifth generation Mesoscale Model (MM5) - GRADS António», *Rel. Tec. LNEG*, p. 50, 2011.
- [57] Caliper Corporation, «Maptitude - Geografic Information System». Disponível em: https://www.caliper.com/maptitude/gis_software/default.htm. [Acedido: 26-Mai-2018].
- [58] A. R. dos Santos, F. C. Eugenio, e F. L. R. D. O. Louzada, «ArcGIS 9.3 Total: Aplicação para Dados Espaciais», São Paulo, Brasil, 2010.
- [59] M. S. T. Sutton, O. Dassau, «Application of Geographic Information Systems (GIS) and Global Positioning Systems (GPS) for ULB’S ServiceS», pp. 1–57, 2009.
- [60] P. A. Burrough, «Principles of geographical information systems for land resources assessment», *Geocarto Int.*, vol. 1, n. 3, pp. 54–54, Jan. 1986.
- [61] D. Carvalho, A. Rocha, e M. Gómez-Gesteira, «Ocean surface wind simulation forced by different reanalyses: Comparison with observed data along the Iberian Peninsula coast», *Ocean Model.*, pp. 31–42, 2012.
- [62] D. Carvalho, A. Rocha, M. Gómez-Gesteira, e C. Silva Santos, «WRF wind simulation and wind energy production estimates forced by different reanalyses: Comparison with observed data for Portugal», *Appl. Energy*, vol. 117, pp. 116–126, Mar. 2014.
- [63] S. Saha e et al., «NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory», 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5065/D61C1TXF>. [Acedido: 08-Fev-2017].
- [64] J. Molod, A., Takacs, L., Suarez, M. e Bacmeister, «Desenvolvimento do modelo de circulação geral atmosférica GEOS-5: evolução de MERRA para MERRA2», 2015. .
- [65] N. C. for E. P. W. Service/NOAA/U.S., «Department of Commerce. 1995, updated quarterly.

- NCEP/NCAR Global Reanalysis 8-day Forecast Products. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory», 2017. Disponível em: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds090.1/>. [Acedido: 27-Jun-2017].
- [66] Dee *et al.*, «The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological», *RDA nota explicativa*, p. 3, 2014.
- [67] N. C. for E. P. W. Service/NOAA/U.S., «National Centers for Environmental Information - NOAA», 2017. Disponível em: <http://www.ncep.noaa.gov/>. [Acedido: 20-Jul-2003].
- [68] J. Little e C. Moler, «MATLAB». Disponível em: https://www.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=hp_products_matlab. [Acedido: 04-Fev-2018].
- [69] Vestas Wind Systems, «V52-850 kW The turbine that goes anywhere», Randers, Denmark, 2005.
- [70] Vestas Wind Systems, «V80-2.0MW Technical Catalogue», Randers, Denmark, 2011.
- [71] Suisseéole, Swisenergy, e METEOTEST, «The Swiss Wind Power Data Website», 2018. Disponível em: <https://wind-data.ch/tools/powercalc.php?lng=en>. [Acedido: 23-Ago-2017].
- [72] USGS, «United State Geological Survey - USGS», 2017. Disponível em: <https://viewer.nationalmap.gov/basic/?basemap=b1&category=ustopo&title=US Topo Download#>. [Acedido: 01-Mai-2017].
- [73] Governo de Cabo Verde, «Resolução nº 11/2007», *BOLETIM OFICIAL- I Série, Número 5*, Praia, Cabo Verde, p. 20, 2003.
- [74] DIVA - GIS, «DIVA - GIS», 2017. Disponível em: <http://www.diva-gis.org/datadown>. [Acedido: 01-Jun-2017].
- [75] INE Cabo Verde, «RGPH 2010 – CABO VERDE EM NUMEROS», 2017. Disponível em: <http://ine.cv/quadros/rgph-2010-cabo-verde-em-numeros/>. [Acedido: 20-Jul-2010].

8. Anexos

A. Calibração das parametrizações físicas do modelo MM5

O modelo numérico MM5 permite a escolha de várias parametrizações para simular processos físicos como a radiação, o efeito da superfície terrestre e marítima nas camadas subjacentes da atmosfera, camada limite planetária, microfísica das nuvens, entre outros. Nesse sentido, e de forma a caracterizar o mais rigorosamente possível a velocidade e direção do vento na região em estudo, o modelo foi calibrado através de testes de sensibilidade, optando-se por analisar os processos físicos com maior impacto nos parâmetros meteorológicos em análise:

-*IMPHYS*, esquemas de microfísica - caracterizam os processos de nuvens e precipitação à escala do modelo;

-*ICUPA*, esquemas de cúmulos – caracterizam os fluxos verticais de subescala, precipitação convectiva e as nuvens;

-*IBLTYP*, esquemas da camada limite planetária - caracterizam os fluxos de subescala verticais devido à turbulência.

Os diferentes testes de sensibilidade as parametrizações, efetuadas dentro de cada opção física, são apresentados na Tabela 21. Nesta tabela, as modificações entre cada teste de sensibilidade são sombreadas a cinzento. Para todos os testes efetuados as opções físicas associadas aos esquemas de radiação (IFRAD) e de solo (ISOIL) mantiveram-se constantes com o código de numeração de 2 – *Cloud e 1 - Yes*, respetivamente.

Tabela 21 –Variações das parametrizações efetuadas dentro de cada opção física.

Parametrizações	Domínios – Resolução	Teste 0	Teste 1	Teste 2	Teste 3 / Teste 4*	Teste 5	Teste 6
IMPHYS	1º- 27 km	5	5	5	4	4	4
	2º- 9 km	5	5	5	4	4	4
	3º- 3 km	5	5	5	4	4	4
	4º- 1 km	5	5	5	4	4	4
IBLTYP	1º- 27 km	2	5	4	2	6	2
	2º- 9 km	2	5	4	2	6	2
	3º- 3 km	2	5	4	2	6	2
	4º- 1 km	2	5	4	2	6	2
ICUPA	1º- 27 km	3	3	3	3	3	6
	2º- 9 km	3	3	3	3	3	6
	3º- 3 km	1	1	1	1	1	1
	4º- 1 km	1	1	1	1	1	1

* Parametrizações físicas do Teste 4 são idênticas ao Teste 3, apenas é testada uma suavização da topografia utilizada em cada domínio de simulação. Não se verificaram melhorias sendo esta suavização descartada nos restantes testes.

Os resultados dos parâmetros estatísticos analisados são apresentados nas **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** Figuras 8.1, 8.2 e 8.3. Os valores apresentados para os diferentes parâmetros estatísticos descritos na secção 5.1.1 - Seleção das condições de fronteira/iniciais do modelo (*RMSE*, *MAE* e *Viés*) baseiam-se nos resultados obtidos para o domínio de simulação de 1km com discretização horária e correspondem aos valores médios para as três estações meteorológicas disponíveis na região em estudo (secção 4.1.1- Seleção das condições de fronteira/iniciais do modelo). Devido ao elevado esforço computacional requerido para as simulações de 1kmx1km, optou-se por utilizar numa primeira fase apenas o mês de abril de 2015 para identificação das parametrizações mais adequadas para a região em estudo.

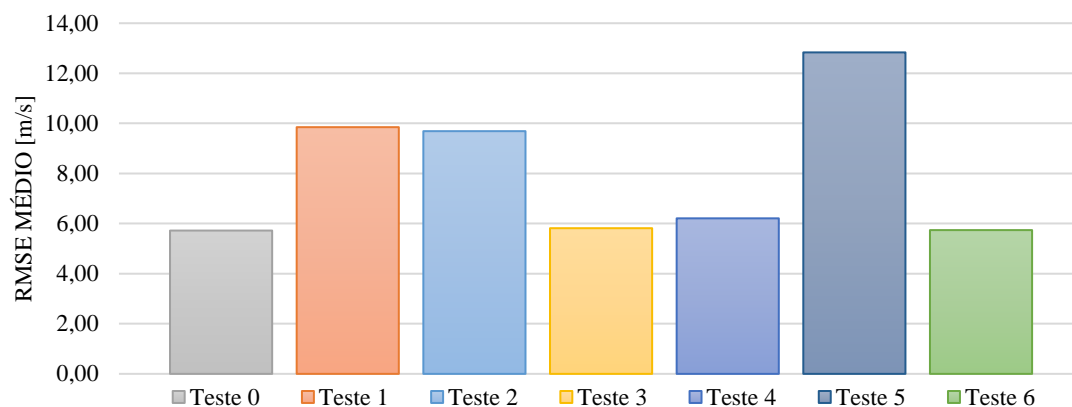


Figura 8.1 – Erro médio quadrático (RMSE) para os diferentes testes efetuados para o mês de abril de 2015.

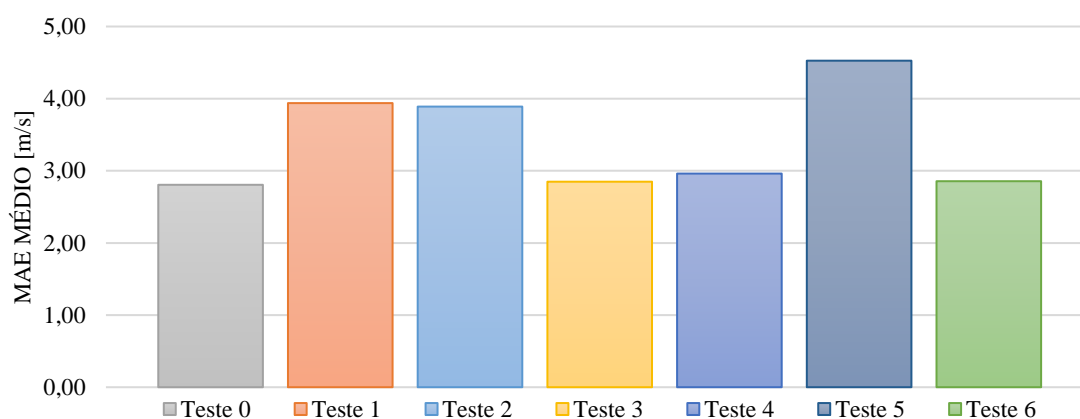


Figura 8.2 – Erro médio absoluto (MAE) para os diferentes testes efetuados para o mês de abril de 2015.

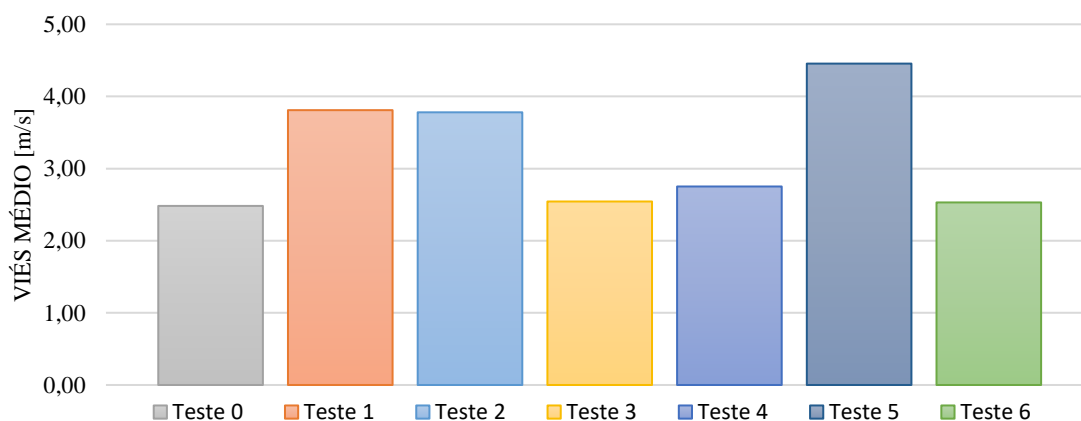


Figura 8.3 – Viés para os diferentes testes efetuados para o mês de abril de 2015.

Da análise dos resultados anteriores é possível verificar que para o período analisado, o teste 0 e 6 apresentam a melhor performance exibindo valores semelhantes para os diferentes parâmetros estatísticos. Desta forma, realizaram-se mais duas simulações para o mês de agosto recorrendo às

parametrizações dos testes 0 e 6 de modo a decidir quais as parametrizações mais adequadas para a região em estudo, Figura 8.4.

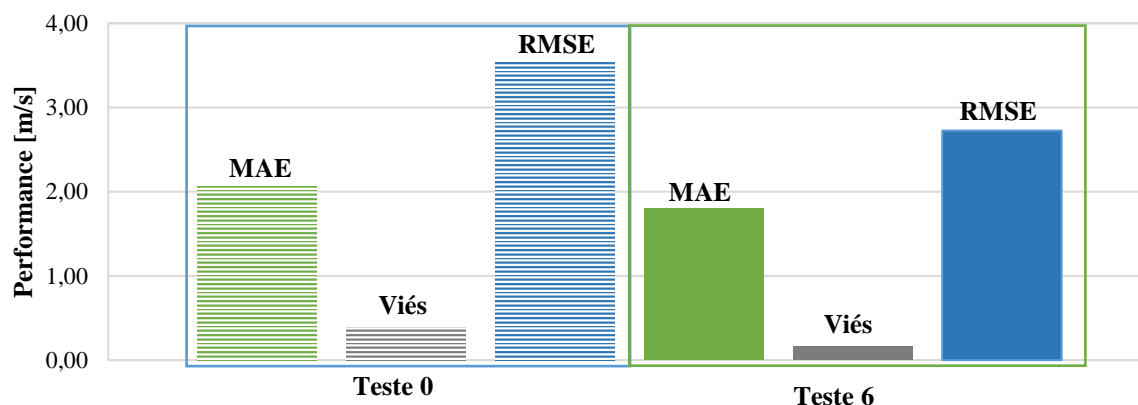


Figura 8.4 – Parâmetros estatísticos correspondentes aos testes 0 (barras com padrão) e 6 (barras preenchidas a cheio) para o mês de agosto de 2015.

Através da análise da Figura 8.4 é possível verificar que o teste 6 apresenta a melhor performance em todos os parâmetros estatísticos analisados, representado de forma mais precisa a variabilidade da velocidade do vento observada nas estações meteorológicas disponíveis para o arquipélago de Cabo Verde. Adicionalmente, é ainda possível verificar que os desvios obtidos durante o mês de agosto de 2015 são substancialmente inferiores aos observados no mês de abril de 2015.

B. Análise da variabilidade do recurso eólico

O facto da extensão do período simulado ser inferior ao desejável para ser representativo do escoamento atmosférico de longo termo (Figura 3.9 – secção 3.1.3.1 - Parâmetros condicionantes do aproveitamento eólico), torna-se necessário efetuar uma análise da variabilidade interanual. O projeto de reanálises GFS só dispõe de dados após fevereiro de 2015, sendo necessário recorrer aos dados dos projetos de reanálises MERRA2 e ERA-Interim para compreender climatologicamente o período simulado. Assim, foram calculados os coeficientes de correlação dos valores da intensidade do vento entre os dados do projeto de reanálises que alimentaram o modelo, com os resultados das reanálises do MERRA2 e ERA-Interim para os registros disponíveis, Tabela 22. Os pontos de cada projeto foram extraídos para a localização das três estações meteorológicas disponíveis no arquipélago.

Tabela 22 – Correlação da intensidade do vento entre o projeto reanálise GFS (utilizado na simulação) e os projetos MERRA2 e Era-Interim.

Reanálise	Estação meteorológica			
	GVAC	GVSV	GVNP	Média
MERRA2	0,983	0,979	0,988	0,984
ERA-Interim	0,983	0,968	0,989	0,980

Da análise da Tabela 22, pode-se concluir que o projeto reanálise MERRA2 obteve uma melhor performance em termos da correlação. Nesse sentido, os dados da velocidade do vento utilizados no estudo da variabilidade de longo termo (período de 20 anos, compreendido entre fevereiro de 1997 e janeiro de 2017) do recurso eólico para o arquipélago de Cabo Verde para as três estações meteorológicas são provenientes do projeto MERRA2 (Figura 8.5).

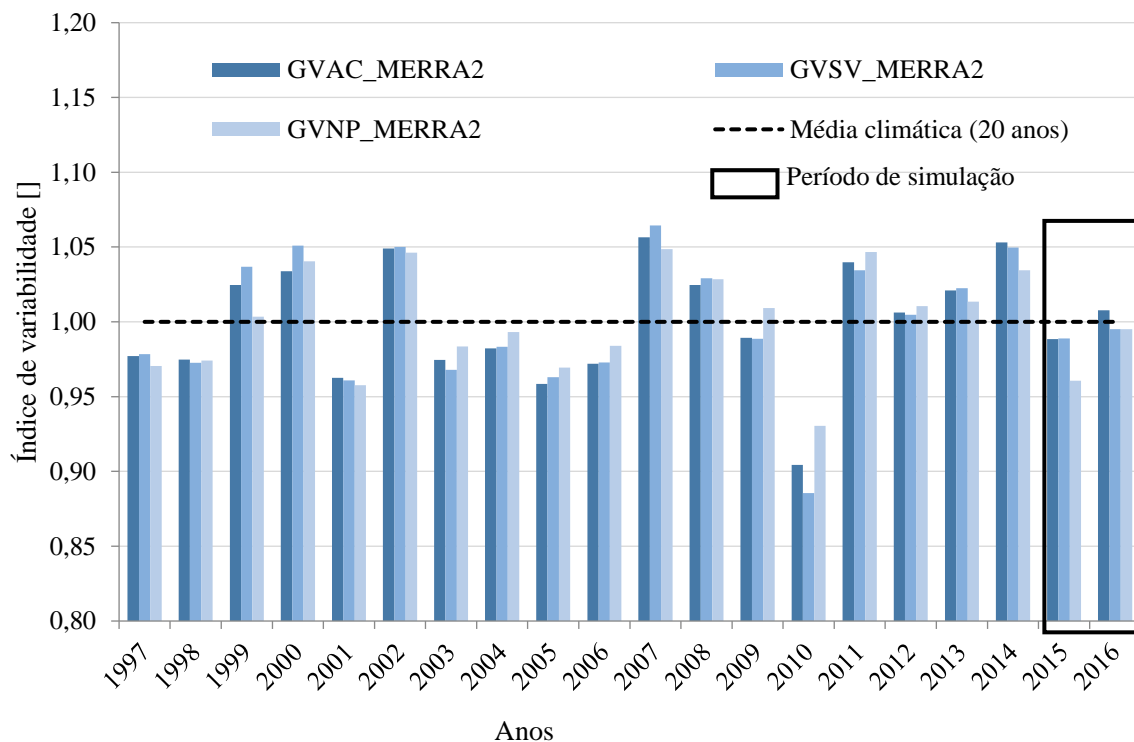


Figura 8.5 – Variabilidade do recurso eólico para o arquipélago de Cabo Verde de 1997 a 2017 para as três estações meteorológicas em estudo.

Pela observação do gráfico apresentado na Figura 8.5, verifica-se que as velocidades médias anuais para as três estações meteorológicas não apresentam variações acentuadas em torno da média dos últimos vinte anos. O padrão da variação da velocidade média ao longo dos vinte anos de dados para as três estações manteve-se, ou seja, quando a velocidade média de uma estação meteorológica é superior à média de longo termo, as velocidades médias das outras duas estações também são superiores à média de longo termo, e *vice-versa*. A maior variação acontece no ano 2010, onde a velocidade média é inferior à média de longo termo em aproximadamente 10% para a estação meteorológica GVSV e em 8% para as estações meteorológicas GVAC e GVNP. Assim, conclui-se que a velocidade média anual para o arquipélago de Cabo Verde apresenta uma baixa variabilidade interanual, característica esta relevante para o aproveitamento eólico.

Após análise da variabilidade do recurso eólico com o MERRA2, optou-se por não efetuar qualquer correção à velocidade média do vento para o período de simulação, fevereiro 2015 até janeiro 2017, uma vez que os valores relativos a estes anos, que são utilizados na simulação do campo médio da velocidade do vento, encontram-se bastante próximos da média climatológica de longo termo (20 anos).

C. Mapa dos declives do terreno para cada ilha

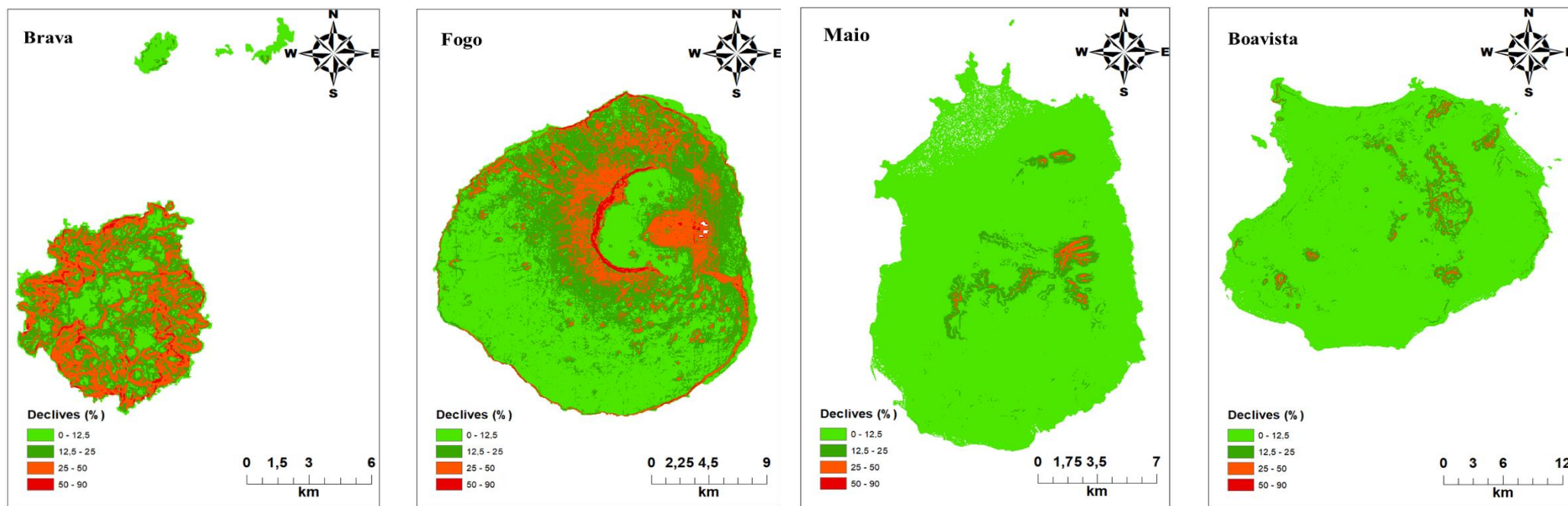


Figura 8.6 – Declive do terreno para todas as ilhas de Cabo Verde.

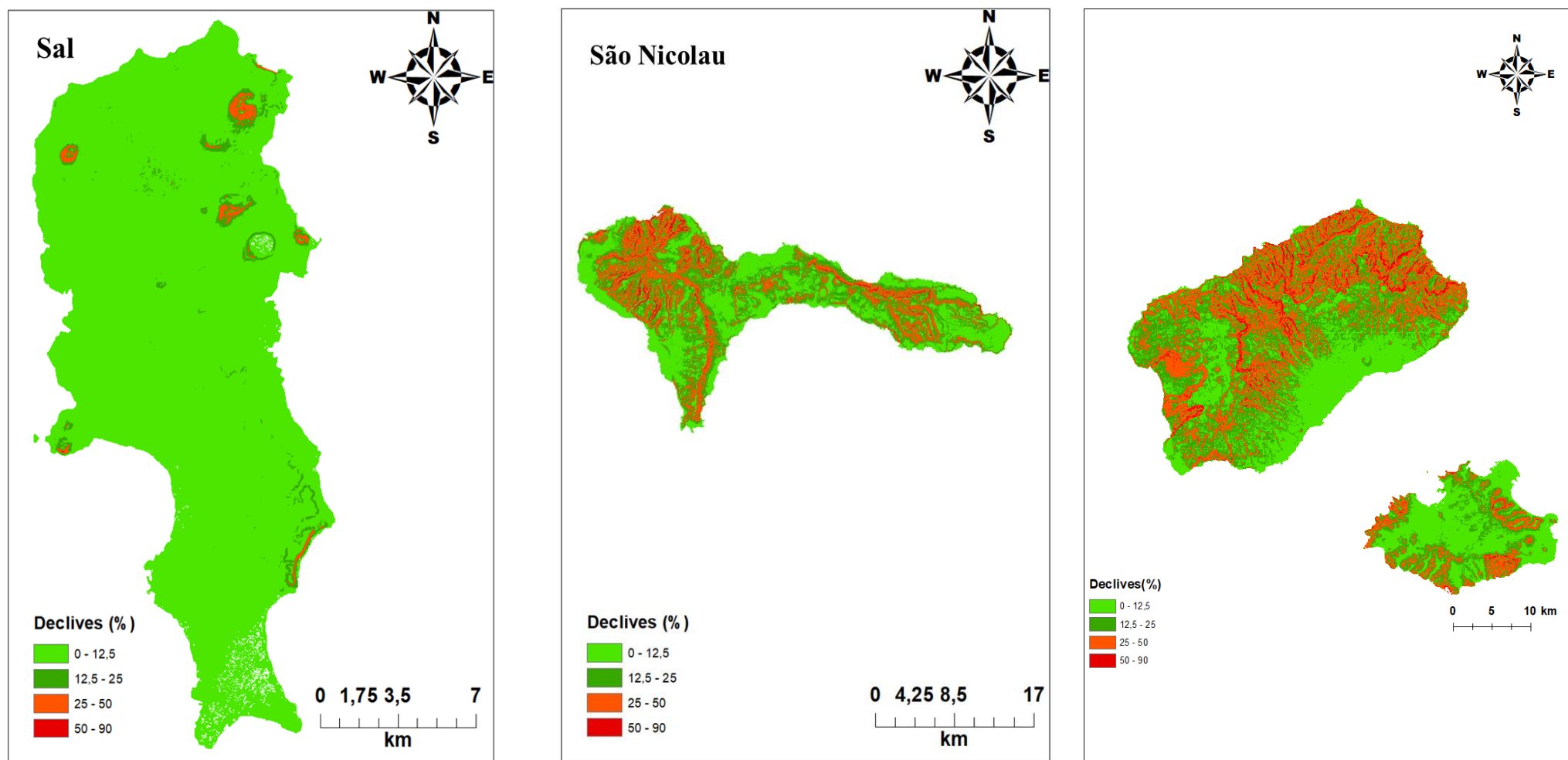


Figura 8.6 – Declive do terreno para todas as ilhas de Cabo Verde (continuação).

D. Mapa da densidade populacional

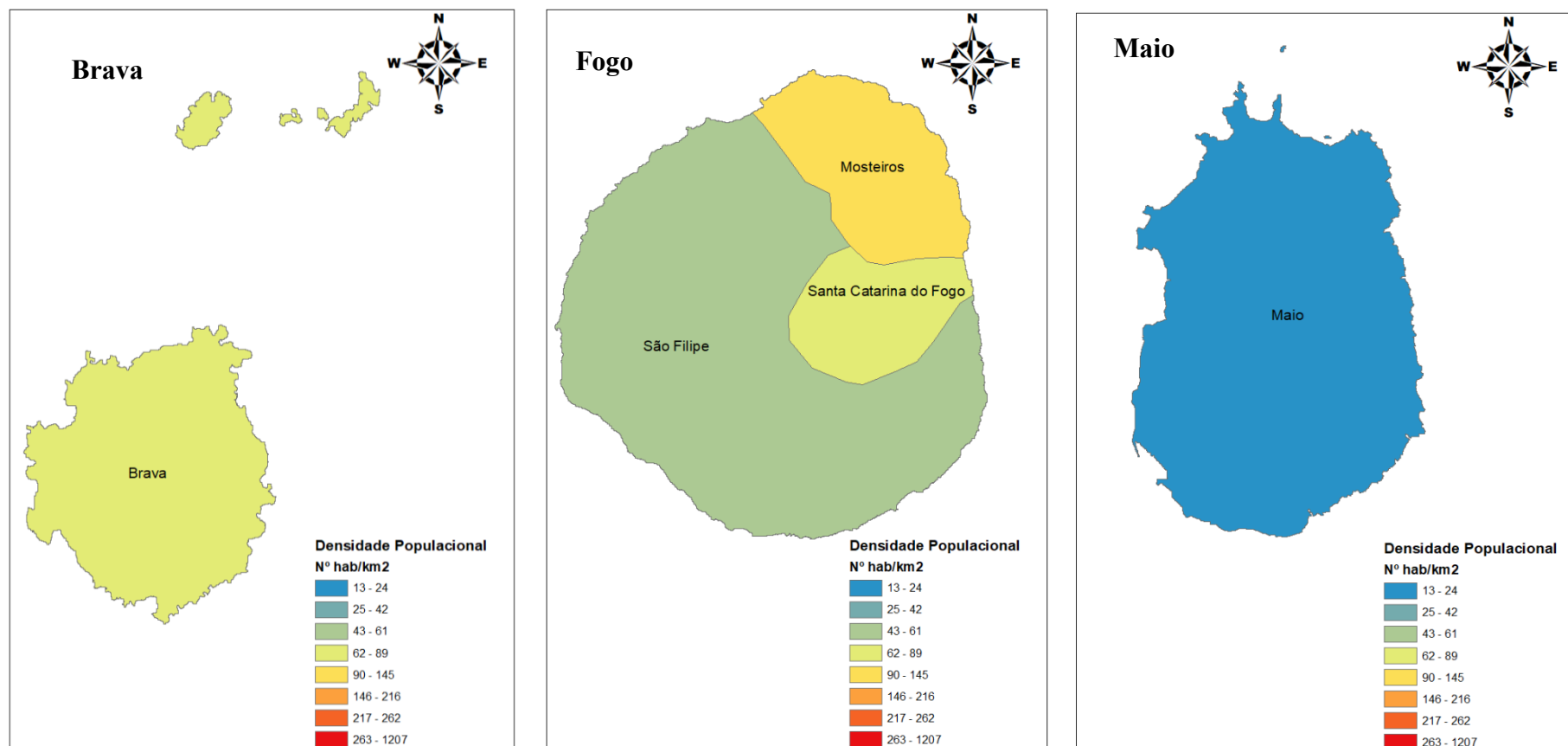


Figura 8.7 – Mapa da densidade populacional para os diferentes concelhos.

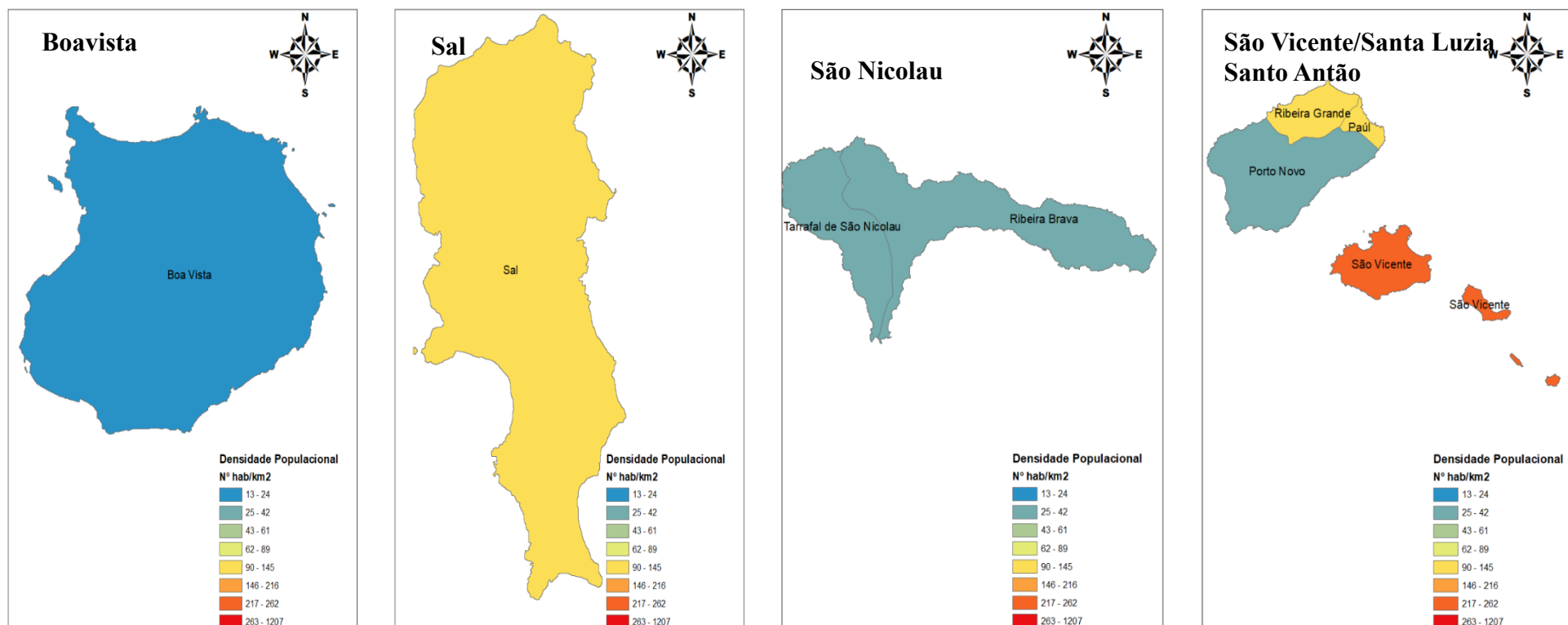


Figura 8.7 – Mapa da densidade populacional para os diferentes concelhos (Continuação).

E. Mapas dos acessos, das zonas protegidas e dos parques eólicos existentes em Cabo Verde

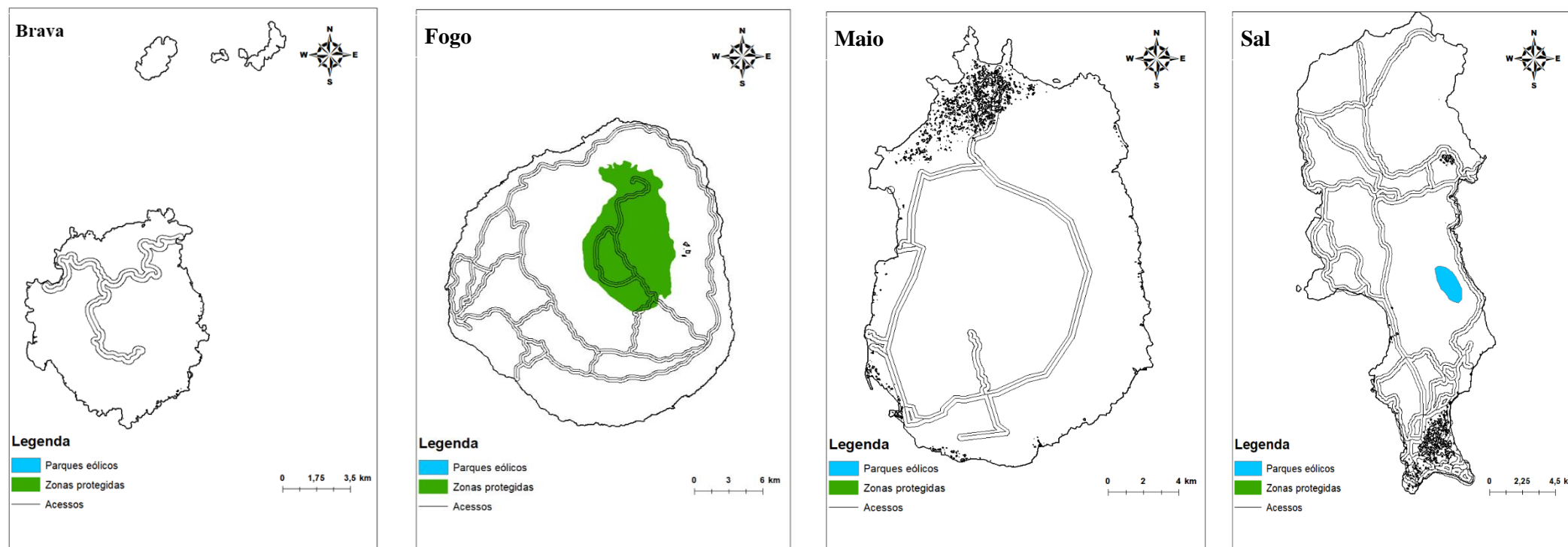


Figura 8.8 – Mapa dos acessos, zonas protegidas e das áreas ocupadas pelos parques eólicos existentes para todas as ilhas de Cabo Verde.

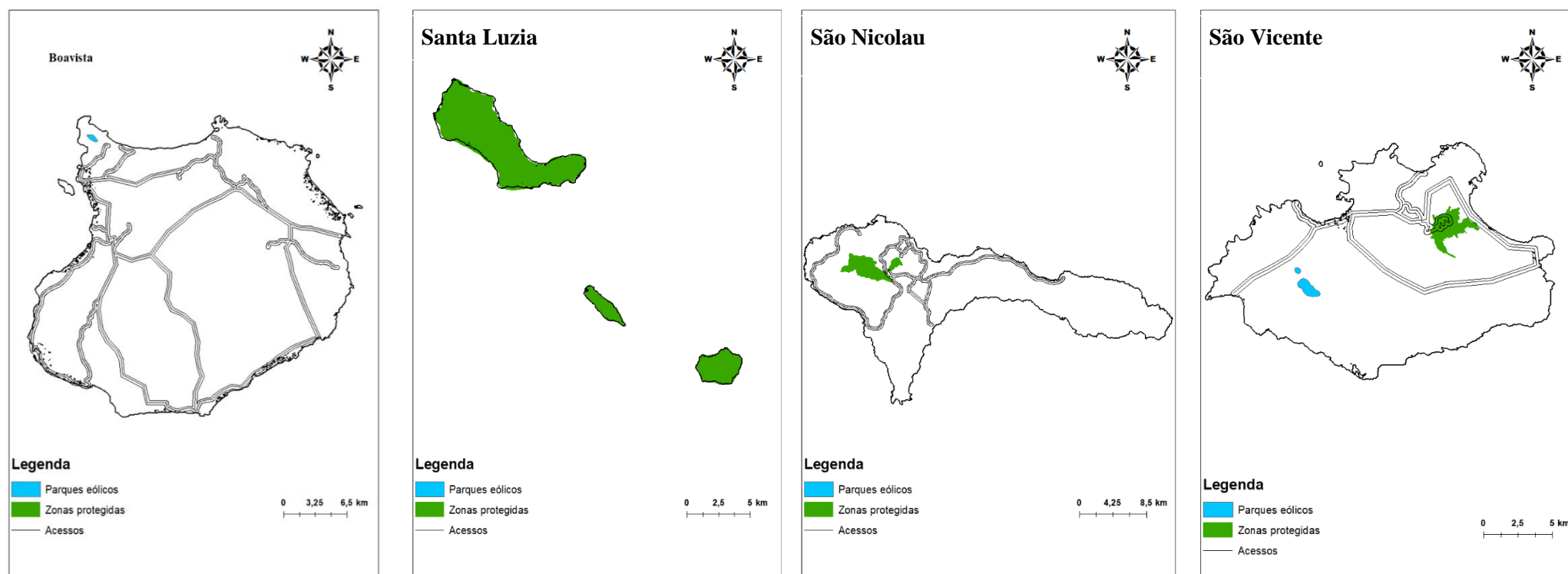


Figura 8.8 – Mapa dos acessos, zonas protegidas e das áreas ocupadas pelos parques eólicos existentes para todas as ilhas de Cabo Verde. (Continuação).

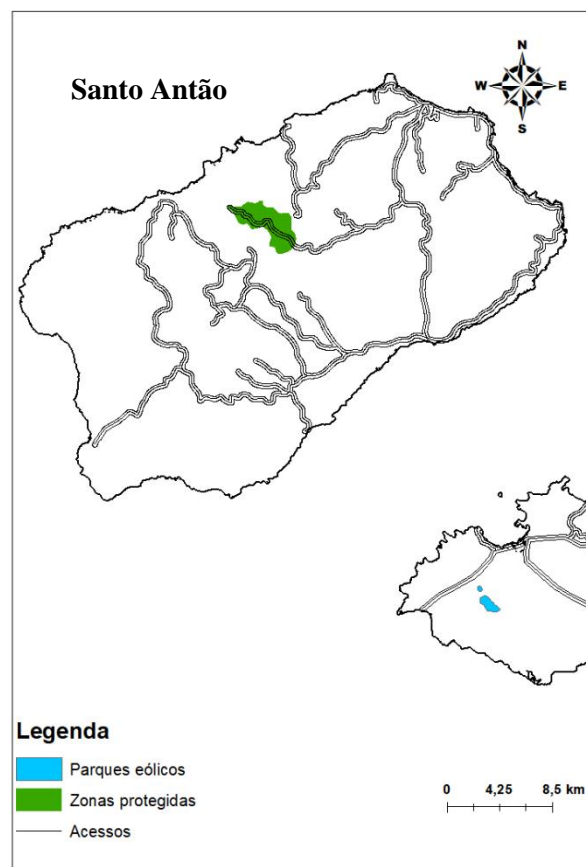


Figura 8.8 – Mapa dos acessos, zonas protegidas e das áreas ocupadas pelos parques eólicos existentes para todas as ilhas de Cabo Verde. (Continuação)

F. Mapas das restrições ambientais e de terreno

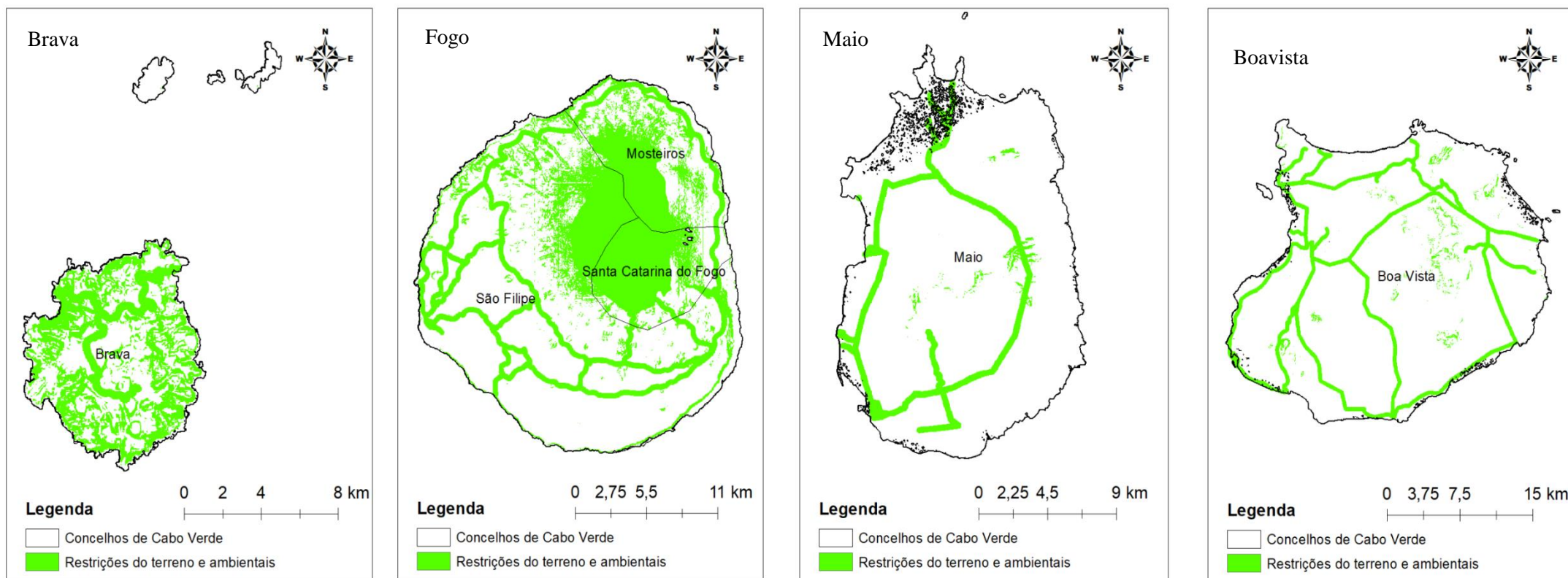


Figura 8.9 – Mapa da união das restrições ambientais e do terreno.

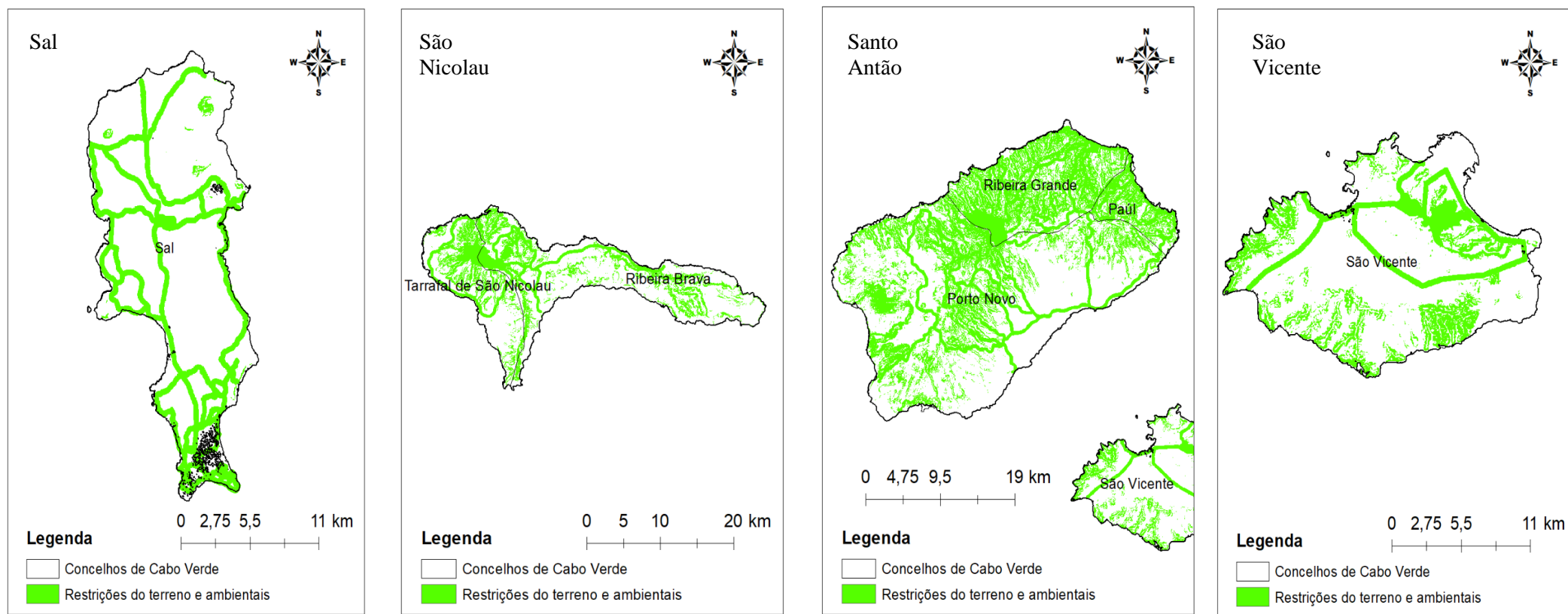


Figura 8.9 – Mapa da união das restrições ambientais e do terreno (Continuação).

G. Mapas dos parâmetros de Weibull (A e k) para alturas de 52 e 80 metros

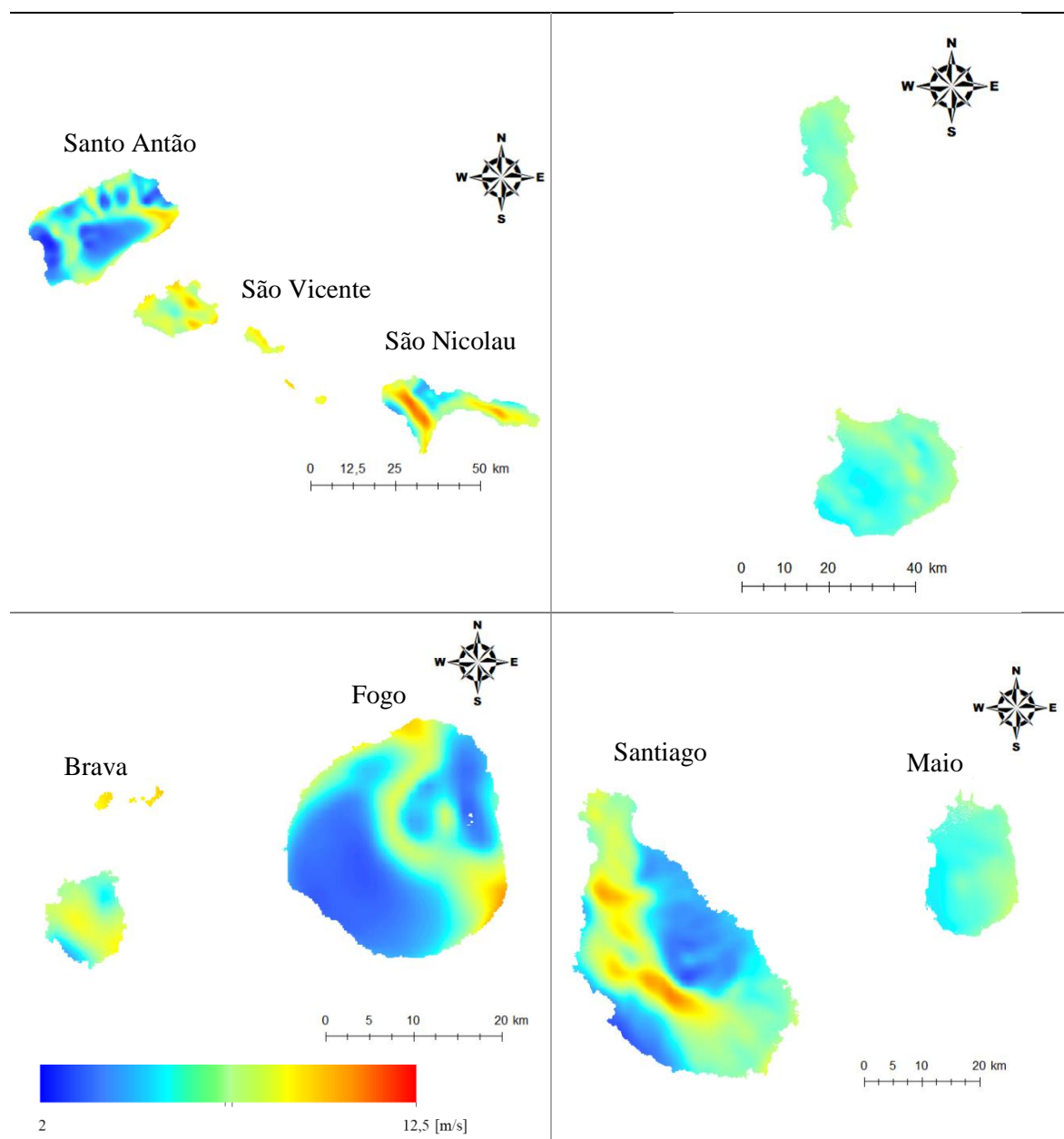


Figura 8.10 – Mapas do parâmetro de escala da distribuição de Weibull (A [m/s]) para uma altura de 52 metros.

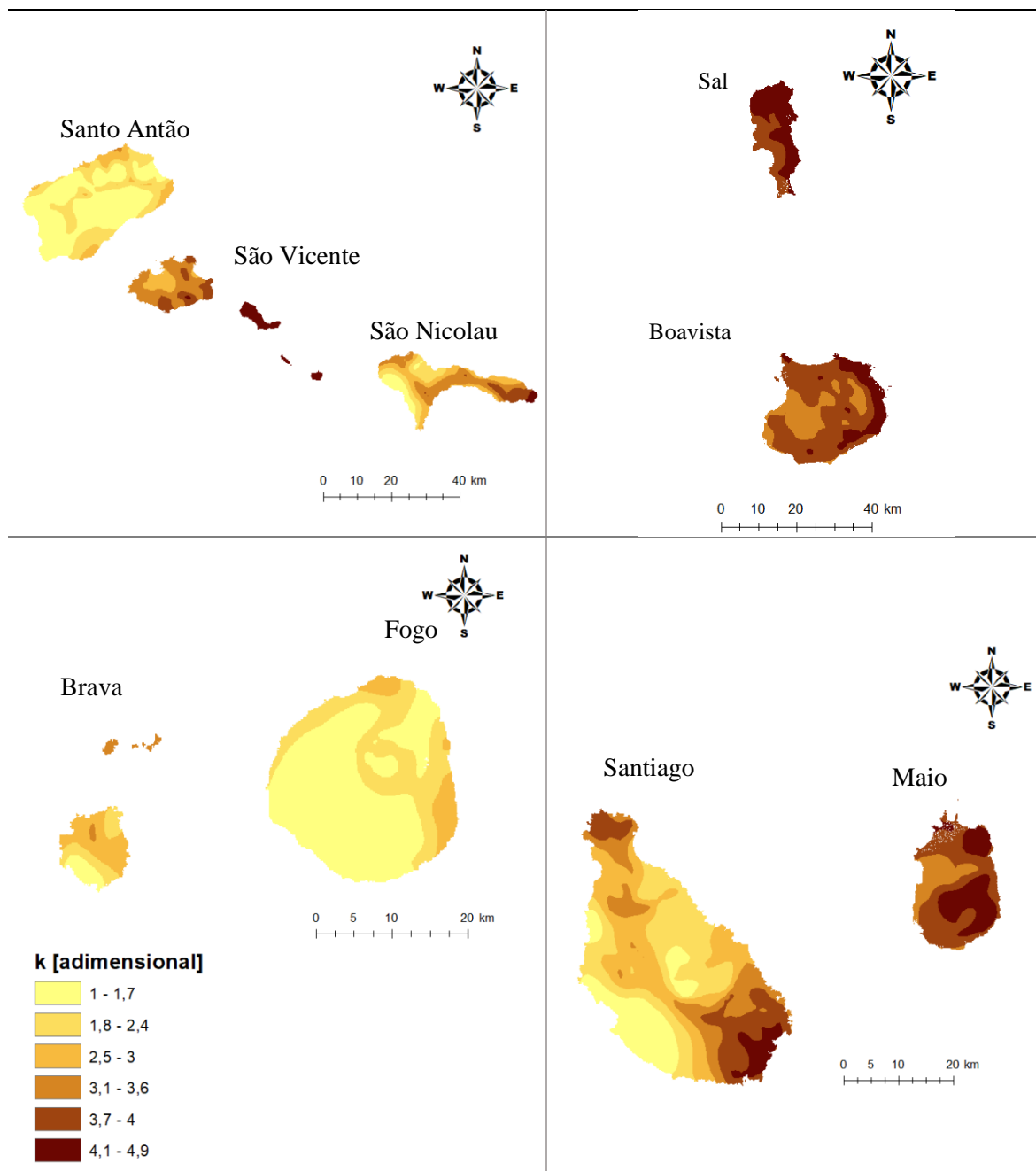


Figura 8.11 – Mapas do parâmetro de forma da distribuição de Weibull (k) para uma altura de 52 metros.

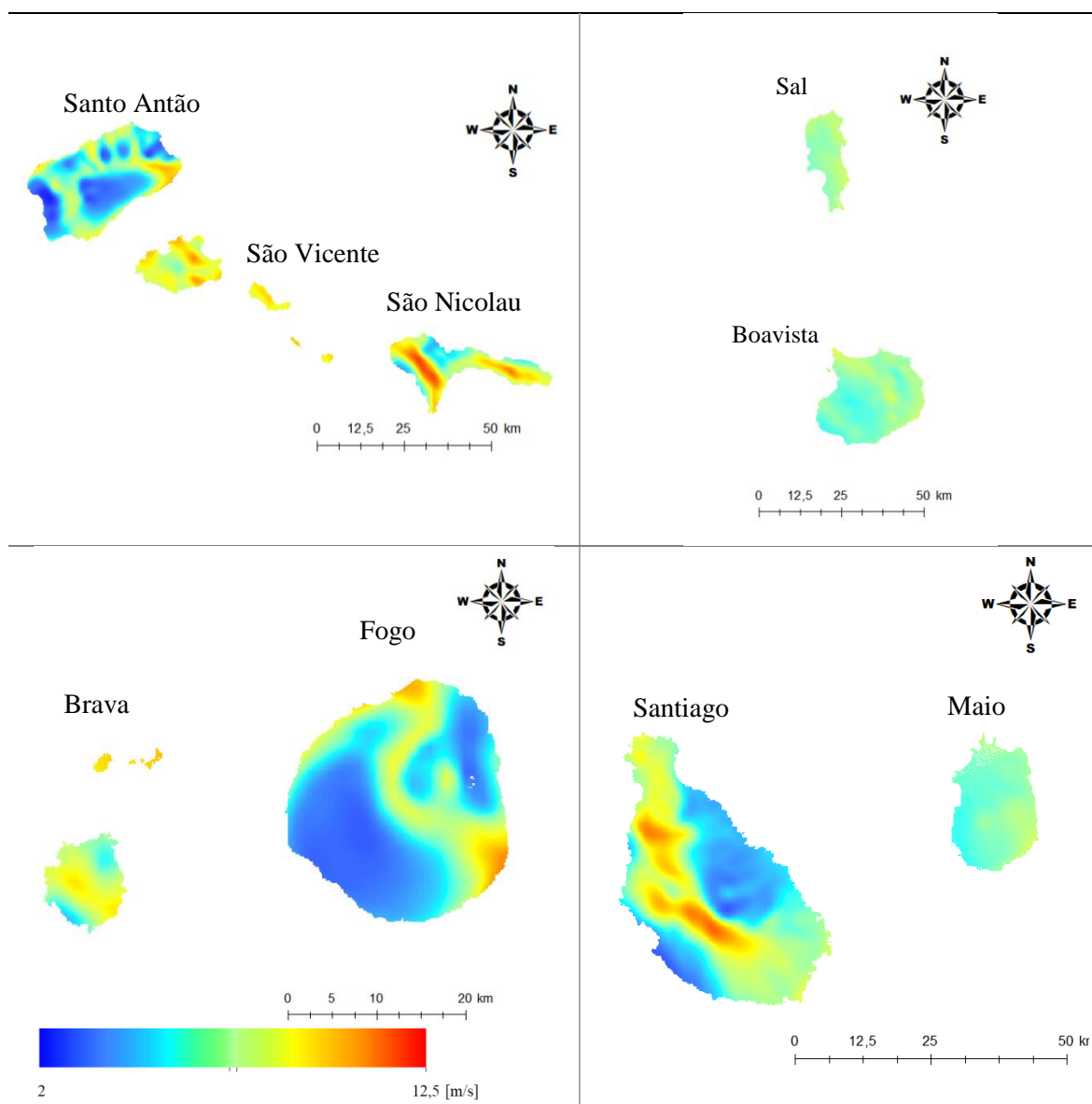


Figura 8.12 – Mapas do parâmetro de escala da distribuição de Weibull (A [m/s]) para uma altura de 80 metros.

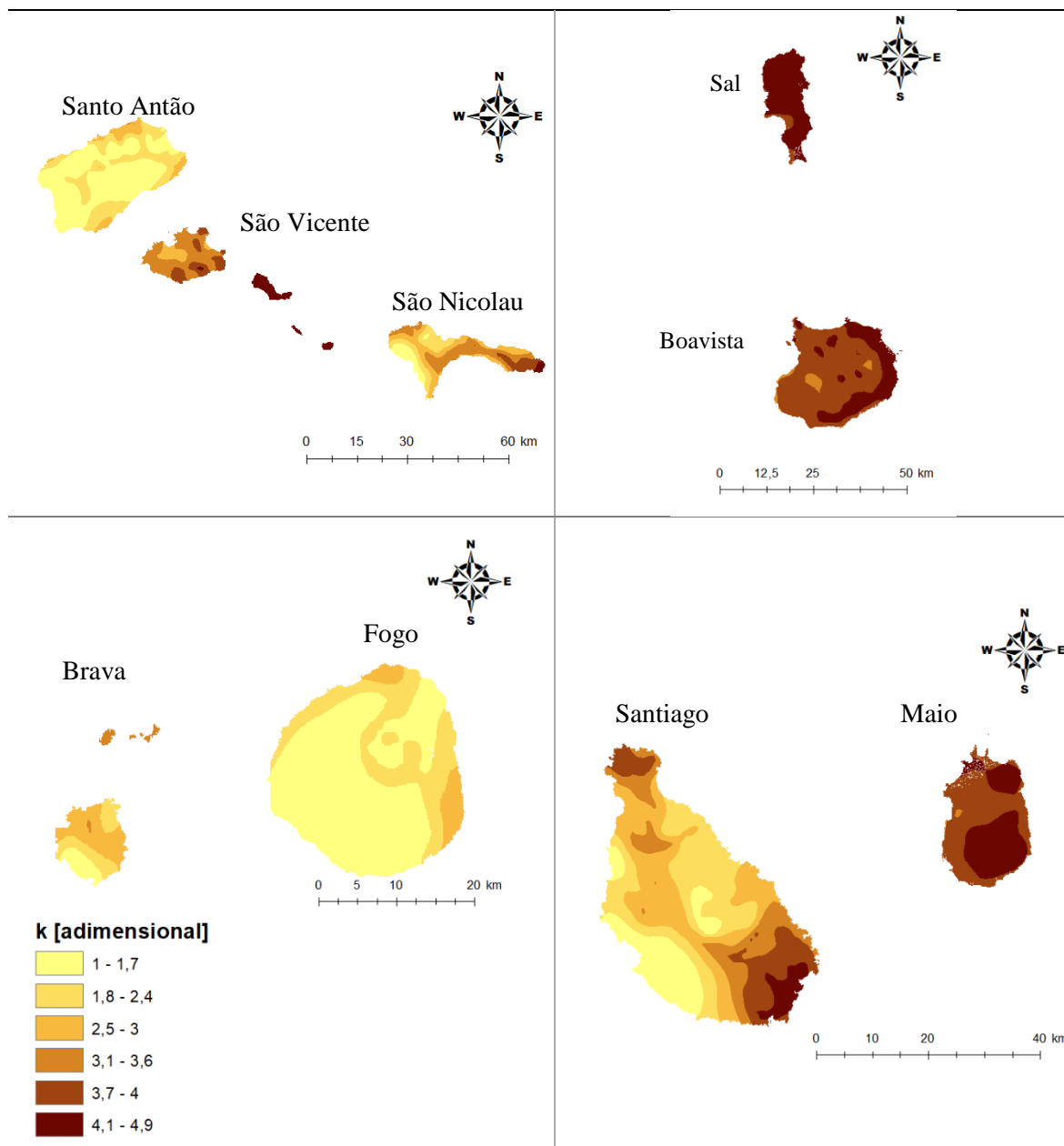


Figura 8.13 – Mapas do parâmetro de forma da distribuição de Weibull (k) para uma altura de 80 metros.